

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Mindaugas MACIJAUŠKAS

CHEMINIŲ ĮMAIŠŲ IR MINERALINIŲ  
PRIEDŲ POVEIKIS CEMENTINIŲ MIŠINIŲ  
REOLOGINĖMS SAVYBĖMS IR  
TRAUKUMUI

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,  
MEDŽIAGŲ INŽINERIJA (T 008)



LEIDYKLA  
Vilnius TECHNIKA 2019

Disertacija rengta 2014–2019 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

**Vadovas**

doc. dr. Gintautas SKRIPKIŪNAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – T 008).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Medžiagų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

**Pirmininkas:**

dr. Valentin ANTONOVIČ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – T 008).

**Nariai:**

dr. Harald JUSTNES (Norvegijos mokslo ir technologijų universitetas, medžiagų inžinerija – T 008),

dr. Modestas KLIGYS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – T 008),

dr. Danutė VAIČIUKYNIENĖ (Kauno technologijos universitetas, statybos inžinerija – T 002),

prof. dr. Juozas VALIVONIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002).

Disertacija bus ginama viešame Medžiagų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2019 m. rugpjūčio 28 d. 10 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto Senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel. (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2019 m. liepos 26 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2019-032-M mokslo literatūros knyga  
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-476-189-8

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2019

© Mindaugas Macijauskas, 2019

*[mindaugas.macijauskas@vgtu.lt](mailto:mindaugas.macijauskas@vgtu.lt)*

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Mindaugas MACIJASKAS

**INFLUENCE OF CHEMICAL ADMIXTURES  
AND MINERAL ADDITIVES ON  
RHEOLOGICAL PROPERTIES AND  
SHRINKAGE OF CEMENT MIXTURES**

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,  
MATERIALS ENGINEERING (T 008)



LEIDYKLA  
Vilnius TECHNIKA 2019

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2014–2019.

**Supervisor**

Assoc. Prof. Dr Gintautas SKRIPKIŪNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – T 008).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Materials Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

**Chairman:**

Dr Valentin ANTONOVIČ (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – T 008).

**Members:**

Dr Harald JUSTNES (Norwegian University of Science and Technology, Materials Engineering – T 008),

Dr Modestas KLIGYS (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – T 008),

Dr Danutė VAIČIUKYNIENĖ (Kaunas University of Technology, Civil Engineering – T 002),

Prof. Dr Juozas VALIVONIS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Materials Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **10 a. m. on 28 August 2019.**

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 26 July 2019.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

# Reziumė

Projektuojant betonines ir gelžbetonines konstrukcijas su dideliu atviru paviršiumi dėl pasireiškiančių kietėjančio betono mišinio traukumo deformacijų, kurios dažniausiai sukelia konstrukcijų supleišėjimą, konstrukcijose ribojamas atstumas tarp išdėstomų deformacinių siūlių. Taip pat dėl šioms konstrukcijoms naudojamų specialių betonavimo technologijų betono mišiniams keliami papildomi reologinių charakteristikų reikalavimai (ribinių šlyties įtempių, plastinės klampos ir tiksotropiškumo). Viena iš galimybių projektuojant betono mišinius, tinkančius tokioms technologijoms, ir siekiant konstrukcijose išvengti plyšių bei padidinti atstumus tarp deformacinių siūlių – įvertinti plačiai naudojamų skirtingų cheminių įmaišų ir mineralinių priedų poveikius cementinių mišinių technologinėms savybėms ir džiūstamojo traukumo deformacijoms skirtingomis technologinėmis sąlygomis.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros sąrašas ir autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas.

Įvadiniamе skyriuje formuluojama problema, darbo aktualumas, darbo tikslas ir uždaviniai, aprašomas tyrimų objektas, tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pateikiamos disertacijos tema autoriaus paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra. Pirmajame skyriuje pateikta literatūros analizė. Analizuojamos cementinių mišinių reologinės savybės, aptarti ir aprašyti taikomi metodai mišinių tiksotropiškumui įvertinti. Išanalizuotas skirtingų veiksmų poveikis tiek mišinių reologinėms savybėms, tiek kietėjančių mišinių džiūstamajam traukumui. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai. Antrajame skyriuje aprašytos tyrimams naudotos medžiagos ir jų pagrindinės savybės bei charakteristikos, pateikta mišinių sudėtis, aprašytas bandinių formavimas, išanalizuoti tyrimų metodai ir laboratorinė įranga. Trečiajame skyriuje pateikiami cementinių tešlų reologinių savybių ir tiksotropiškumo bei kietėjančių cementinių mišinių džiūstamojo traukumo tyrimai ir jų analizės. Analizuojamas ir aprašomas cheminių įmaišų ir mineralinių priedų poveikis projektinių technologinių savybių mišinių traukumui.

Disertacijos tema paskelbti 6 moksliniai straipsniai ir perskaityti 5 pranešimai Lietuvos bei kitų šalių konferencijose.

# Abstract

When designing concrete and reinforced concrete structures with large open surfaces, the distance between the laid deformation of joints is intentionally restricted. This is done in order to control manifesting shrinkage deformations during the curing of concrete mixture, which typically cause cracking of the final structures. Also, due to the specifics of concreting technologies used for these structures, the concrete mixtures are subject to additional requirements of rheological characteristics (yield stresses, plastic viscosity and thixotropy). Therefore, the need to design reliable concrete mixtures, suitable for such technologies arises. Seeking to avoid cracks and increase the distance between deformation joints, one of the options is to evaluate the effects of a variety of widely used chemical admixtures and mineral additives can have on the mixture's technological properties and drying shrinkage deformations under different technological conditions.

The dissertation is comprised of an introduction, three chapters, general conclusions, a list of used references, and a list of the author's scientific publications on the subject of the dissertation.

The introductory chapter defines the problem, the relevance of the thesis, the aim and objectives of the thesis, describes the research object, research methodology, scientific novelty of the thesis, practical significance of work results, and defensible statements. Publications published by the author on the subject of the dissertation, reports in conferences, and the structure of the dissertation are presented at the end of the introduction. The first chapter provides analysis of referenced sources. The rheological properties of cement mixtures are analysed, and methods used for the assessment of thixotropy of mixtures are described and discussed accordingly. Subsequently, the effect of different factors on the rheological properties of mixtures and on drying shrinkage of curing mixtures is discussed. At the end of the chapter, conclusions are drawn and the objectives of the dissertation are refined. In the second chapter, the materials used for the research and their main properties and characteristics are described, the composition of the mixtures are presented, and the formation of their samples described. Test methods and laboratory equipment are analysed and described in conjunction. In the third chapter, the research and analysis of the rheological properties and thixotropy of cement pastes and the research of drying shrinkage in curing cement mixtures is presented. The impact of chemical admixtures and mineral additives on the shrinkage of mixtures with design technological properties is described and analysed.

6 scientific articles have been published on the subject of the dissertation and 5 reports have been presented at conferences in several countries.

---

# Žymėjimai

## Simboliai

$\mu_{pl}$  – plastinė klampa, Pa·s;

$\dot{\gamma}$  – šlyties greitis, s<sup>-1</sup>;

$\tau$  – šlyties įtempiai, Pa;

$\tau_0$  – (dinaminiai) ribiniai šlyties įtempiai, Pa;

$\tau_{0,s}$  – statiniai ribiniai šlyties įtempiai, Pa;

$\varphi_c$  – cemento dalelių koncentracija portlandcemenčio tešloje;

$Eff_{pl}$  – plastifikavimo efektyvumas, %;

R – koreliacijos koeficientas;

R<sup>2</sup> – determinacijos koeficientas;

S – struktūros atsistatymo rodiklis, Pa·min;

Sh – cementinio mišinio džiūstamojo traukumo deformacija, mm/m;

V/C – vandens ir cemento santykis;

V/K – vandens ir kietųjų dalelių santykis;

V<sub>n</sub> – nominalusis vandens kiekis, l;

X – cheminės įmaišos arba mineralinio priedo kiekis procentais cemento masės, %.

## Santrumpos

AEA – orą įtraukianti įmaiša paviršių aktyvinančių medžiagų pagrindu;

CN – rišimosi greitiklis kalcio nitrato pagrindu;

FA – lakieji pelenai;

GGBFS – granuluotas aukštakrosnių šlakas;

LS – plastiklis modifikuotų lignosulfonatų pagrindu;

MAP – superplastiklis modifikuotų akrilo polimerų pagrindu;

PCE – superplastiklis polikarboksilatų esterio polimerų pagrindu;

SF – silicio dioksido ( $\text{SiO}_2$ ) mikrodulkės;

SG – rišimosi lėtiklis natrio gliukonato pagrindu;

SRA – traukumą mažinanti įmaiša paviršių aktyvinančių medžiagų pagrindu;

VMA – klampą modifikuojanti įmaiša didelės molekulinės masės kopolimerų pagrindu.

## Sąvokos

**Betono mišinys** – cemento, smulkiojo ir stambiojo užpildo, priedų (įmaišų) ir vandens mišinys.

**Cementiniai mišiniai** – tai su cemento rišikliu pagaminti statyboje naudojami mišiniai: tiek be užpildų (tešlos); tiek su smulkiuoju užpildu (skiediniai); tiek su smulkiuoju ir stambiuoju užpildu (betono mišiniai).

**Cemento tešla** – cemento, priedų (įmaišų) ir vandens mišinys.

**Cheminė įmaiša** – ruošiant cementinį mišinį įdedama sudedamoji dalis, kurios nedidelis kiekis cemento masės atžvilgiu pakeičia mišinio arba cementinio akmens savybes.

**Dilatantiškumas** – tai cementinių mišinių klampos didėjimas, didėjant šlyties įtempiams ar greičiui.

**Klampa** – medžiagos savybė priešintis tekėjimui, t. y. vieno sluoksnio slinkimui kito sluoksnio atžvilgiu. Klampa pasireiškia dėl suardytos struktūros elementų pasipriešinimo judėjimui.

**Nominalusis vandens kiekis** – vandens kiekis, kuris parenkamas reikiamai cementinio mišinio konsistencijai pasiekti be cheminių įmaišų ir (arba) mineralinių priedų.

**Plastifikavimo efektyvumas** – technologinis rodiklis, kuris vertinamas klampos pokyčio procentais, įmaišius tam tikrą cheminės įmaišos ir (arba) mineralinio priedo kiekį.

**Plastinis stiprumas** – rišimosi proceso metu nesukietėjusio cementinio mišinio stiprumo charakteristika, kuri nustatoma naudojant specialias metodikas (pavyzdžiui, kūgio ar kitokio segmento įsmygimo gylys) ar kitokias metodikas.

**Priedas** – smulkinta cementinio mišinio neorganinė sudedamoji dalis, naudojama tam tikroms savybėms pagerinti arba savitoms savybėms suteikti.

**Ribiniai šlyties įtempiai** – tai šlyties įtempiai, sukeltantys struktūrinio mišinio tekėjimą.

**Skiedinio mišinys** – cemento, smulkiojo užpildo, priedų (įmaišų) ir vandens mišinys.



**Skiedinių džiūstamasis traukumas** – bandinių su smulkiuoju užpildu išilginės deformacijos kietėjimo metu, kai yra kontroliuojamos aplinkos sąlygos – aplinkos oro temperatūra ir santykinė oro drėgmė.

**Struktūros atsistatymo rodiklis (tikotropiškumas)** – tai cementinių mišinių savybė keisti reologines savybes: mažinti klampą veikiant juos mechaniškai ir atkurti buvusias reologines savybes poveikį nutraukus.

**Šlyties greitis** – šlyties deformacijos pokyčio greitis laike. Skaitine reikšme jis lygus dviejų sluoksnių, nutolusių vienu ilgio vienetu, greičių skirtumui.

**Šlyties įtempiai** – mišinio tekėjimą sukeliančio tam tikro slėgio arba jėgos, kurios santykis su sluoksnių sąveikos paviršiaus plotu vadinamas šlyties įtempiais.

**Tekėjimo kreivė** – kreivė, vaizduojanti tekėjimo šlyties greičio priklausomybę nuo šlyties įtempių.

**Vandens poreikis** – faktinis (realusis) vandens kiekis, kuris naudojamas cementiniame mišinyje, esant cheminėms įmaišoms ir (arba) mineraliniams priedams.



---

# Turinys

IVADAS .....	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	2
Darbo tikslas.....	2
Darbo uždaviniai .....	2
Tyrimų metodika .....	3
Darbo mokslinis naujumas .....	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė .....	3
Ginamieji teiginiai .....	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	4
Disertacijos struktūra.....	5
1. CHEMINIŲ ĮMAIŠŲ IR MINERALINIŲ PRIEDŲ POVEIKIO CEMENTINIŲ MIŠINIŲ REOLOGINĖMS SAVYBĖMS IR TRAUKUMUI ANALIZĖ .....	7
1.1. Struktūrinių cementinių mišinių reologinė elgsena ir jos charakteristikos .....	7
1.2. Mikromechaninė cementinių mišinių elgsena .....	12
1.2.1. Cementinių mišinių ribiniai šlyties įtempiai .....	12
1.2.2. Klampa ir jos įtaka cementinių mišinių pseudoplastiškai ir dilatantiškai reologinei elgsenai .....	13
1.2.3. Cementinių mišinių tiksotropiškumas.....	16
1.3. Cementinių mišinių reologinę elgseną ir jos charakteristikas lemiantys veiksniai	17

1.3.1. Technologinių procesų įtaka cementinių mišinių reologinėms charakteristikoms .....	18
1.3.2. Kietųjų dalelių koncentracijos mišinyje įtaka cementinių mišinių ribiniams šlyties įtempiams ir plastinei klampai.....	18
1.3.3. Cemento tešlos koncentracijos mišinyje įtaka cementinių mišinių reologinėms charakteristikoms .....	19
1.3.4. Cemento tipo ir smulkumo įtaka cementinių mišinių reologinėms charakteristikoms .....	21
1.3.5. Cheminių įmaišų įtaka cementinių mišinių reologinėms charakteristikoms .....	22
1.3.6. Mineralinių priedų įtaka cementinių mišinių reologinėms charakteristikoms .....	27
1.4. Cementinių mišinių džiūstamasis traukumas ir jį lemiantys veiksniai .....	29
1.4.1. Cementinių mišinių struktūros poveikis džiūstamajam traukumui .....	30
1.4.2. Cementinių mišinių kietinimo sąlygų poveikis džiūstamajam traukumui ...	33
1.4.3. Betono cheminių įmaišų poveikis cementinių mišinių džiūstamajam traukumui.....	34
1.4.4. Traukumą mažinančių įmaišų veikimo mechanizmas ir poveikis cementinių mišinių džiūstamajam traukumui .....	38
1.4.5. Mineralinių priedų betonui poveikis cementinių mišinių džiūstamajam traukumui.....	40
1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	43
 2. ŽALIAVŲ IR TYRIMŲ METODIKOS APŽVALGA .....	45
2.1. Naudotos medžiagos.....	45
2.2. Mišinių sudėtis .....	51
2.3. Mišinių ruošimas ir bandinių formavimas .....	55
2.4. Tyrimų metodika .....	56
2.4.1. Mišinių reologinių savybių nustatymas .....	56
2.4.2. Mišinių struktūros atstatymo parametrų ir tiksotropiškumo nustatymas .....	58
2.4.3. Mišinių džiūstamojo traukumo deformacijų nustatymas .....	59
2.5. Antrojo skyriaus išvados .....	60
 3. PLASTIFIKAVIMO EFEKTYVUMO POVEIKIS CEMENTINIŲ MIŠINIŲ DŽIŪSTAMOJO TRAUKUMO DEFORMACIJOMS.....	61
3.1. Cemento dalelių koncentracijos tešloje poveikis portlandcemenčio tešlų reologinėms savybėms.....	62
3.1.1. Portlandcemenčio tešlų tekėjimo savybės.....	62
3.1.2. Portlandcemenčio tešlų ribiniai šlyties įtempiai ir plastinė klampa .....	62
3.1.3. Portlandcemenčio tešlų statiniai ribiniai šlyties įtempiai .....	63
3.1.4. Portlandcemenčio tešlų tiksotropiškumas .....	64
3.2. Cheminėmis įmaišomis ir mineraliniais priedais modifikuotų portlandcemenčio tešlų reologinės savybės .....	65
3.2.1. Modifikuotų portlandcemenčio tešlų tekėjimo savybės .....	65

3.2.2. Modifikuotų portlandcemenčio tešlų ribiniai šlyties įtempiai ir plastinė klampa .....	68
3.3. Cheminėmis įmaišomis ir mineraliniais priedais modifikuotų cementinių mišinių struktūros atstatymo parametrai ir tiksotropiškumas .....	76
3.3.1. Modifikuotų portlandcemenčio tešlų statiniai ribiniai šlyties įtempiai .....	76
3.3.2. Modifikuotų portlandcemenčio tešlų tiksotropiškumas .....	88
3.4. Cheminių įmaišų ir mineralinių priedų plastifikavimo efektyvumas ir jo poveikis vandens poreikiui vienodo klampumo portlandcemenčio tešloms .....	94
3.5. Cheminėmis įmaišomis ir mineraliniais priedais modifikuotų cementinių mišinių džiūstamasis traukumas .....	102
3.5.1. Vandens poreikio įtaka cementinių skiedinių džiūstamajam traukumui ....	102
3.5.2. Tešlos kiekio įtaka cementinių skiedinių džiūstamajam traukumui .....	103
3.5.3. Įtraukto oro kiekio įtaka cementinių skiedinių džiūstamajam traukumui ..	105
3.5.4. Traukumą mažinančios įmaišos poveikis cementinių skiedinių džiūstamajam traukumui .....	106
3.5.5. Skirtingo tipo cemento poveikis cementinių skiedinių džiūstamajam traukumui .....	108
3.6. Cheminių įmaišų ir mineralinių priedų poveikis projektinių technologinių savybių cementinių mišinių džiūstamajam traukumui .....	110
3.7. Trečiojo skyriaus išvados .....	116
BENDROSIOS IŠVADOS .....	119
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI .....	121
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS ....	135
SUMMARY IN ENGLISH .....	137
PRIEDAI <sup>1</sup> .....	153
A priedas. Skirtingos cemento dalelių koncentracijos portlandcemenčio tešlos tekėjimo kreivės .....	155
B priedas. Cheminėmis įmaišomis modifikuotos portlandcemenčio tešlos tekėjimo kreivės .....	156
C priedas. Mineraliniais priedais modifikuotos portlandcemenčio tešlos tekėjimo kreivės .....	159
D priedas. Autoriaus sąžiningumo deklaracija .....	160
E priedas. Bendra autorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje .....	161
F priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos .....	162

<sup>1</sup> Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.



---

# Contents

INTRODUCTION .....	1
Problem formulation.....	1
Relevance of the thesis .....	2
Research object.....	2
Aim of the thesis.....	2
Objectives of the thesis.....	2
Research methodology .....	3
Scientific novelty of the thesis .....	3
Practical value of the research findings .....	3
Defended statements.....	4
Approval of the research findings .....	4
Structure of the thesis .....	5
 1. ANALYSIS OF THE EFFECT OF CHEMICAL ADMIXTURES AND MINERAL ADDITIVES ON THE RHEOLOGICAL PROPERTIES AND SHRINKAGE OF CEMENT MIXTURES .....	 7
1.1. Rheological behavior of structural cement mixtures and its characteristics .....	7
1.2. Micromechanical behavior of cement mixtures.....	12
1.2.1. Yield stresses of cement mixtures.....	12
1.2.2. Viscosity and its influence on the pseudoplasticity and dilatant rheological behaviour of cement mixtures .....	13
1.2.3. Thixotropy of cement mixtures .....	16

1.3. Factors determining the rheological behaviour and its characteristics of cement mixtures .....	17
1.3.1. Influence of the technological processes, affecting the mixture, on rheological characteristics of a cement mixture.....	18
1.3.2. Influence of the solid particles concentration in the mixture on the yield stresses and plastic viscosity of a cement mixture.....	18
1.3.3. Influence of cement paste content in the mixture on rheological characteristics of a cement mixture .....	19
1.3.4. Influence of cement type and cement fineness on rheological characteristics of a cement mixture .....	21
1.3.5. Influence of chemical admixtures on rheological characteristics of a cement mixture .....	22
1.3.6. Influence of mineral additives on rheological characteristics of a cement mixture .....	27
1.4. Drying shrinkage of cement mixtures and the factors that determine it .....	29
1.4.1. Effect of cement mixture structure on the drying shrinkage .....	30
1.4.2. Effect of cement mixture curing conditions on the drying shrinkage .....	33
1.4.3. Effect of chemical admixtures on the drying shrinkage of cement mixtures .....	34
1.4.4. Shrinkage reducing admixtures, their mechanism, and the effect on the drying shrinkage of cement mixtures .....	38
1.4.5. Effect of mineral additives on the drying shrinkage of cement mixtures...	40
1.5. Conclusions of the Chapter 1 and formulation of the objectives of the doctoral thesis .....	43
2. OVERVIEW OF RAW MATERIALS AND RESEARCH METHODOLOGY .....	45
2.1. Materials used.....	45
2.2. Composition of mixtures .....	51
2.3. Preparation of mixtures and formation of samples .....	55
2.4. Research methodology .....	56
2.4.1. Determination of rheological properties of mixtures .....	56
2.4.2. Determination of the thixotropy and structural build-up parameters of mixtures .....	58
2.4.3. Determination of the deformations of the drying shrinkage of mixtures ...	59
2.5. Conclusions of the Chapter 2.....	60
3. RESEARCH OF THE PLASTICISATION EFFICIENCY OF CHEMICAL ADMIXTURES AND MINERAL ADDITIVES ON THE DEFORMATIONS OF THE DRYING SHRINKAGE OF THE CEMENT MIXTURES .....	61
3.1. Effect of the cement particles concentration in the paste on rheological properties of Portland cement pastes .....	62
3.1.1. Flow properties of Portland cement pastes .....	62
3.1.2. Yield stresses and plastic viscosity of Portland cement pastes .....	62
3.1.3. Static yield stresses of Portland cement pastes .....	63



3.1.4. Thixotropy of Portland cement pastes .....	64
3.2. Rheological properties of Portland cement pastes modified with chemical admixtures and mineral additives .....	65
3.2.1. Flow properties of modified Portland cement pastes.....	65
3.2.2. Yield stresses and plastic viscosity of modified Portland cement pastes .....	68
3.3. Thixotropy and structural build-up parameters of cement mixtures modified with chemical admixtures and mineral additives .....	76
3.3.1. Static yield stresses of modified Portland cement pastes.....	76
3.3.2. Thixotropy of modified Portland cement pastes .....	88
3.4. Efficiency of plasticisation of chemical admixtures and mineral additives and its effect on the water demand to obtain Portland cement pastes of identical viscosity .....	94
3.5. Drying shrinkage of cement mixtures modified with chemical admixtures and mineral additives.....	102
3.5.1. Effect of the change in water demand on the drying shrinkage of cement mortars .....	102
3.5.2. Effect of the change in the content of paste on the drying shrinkage of cement mortars .....	103
3.5.3. Effect of the entrained air amount on the drying shrinkage of cement mortars.....	105
3.5.4. Effect of the amount of the shrinkage reducing admixture on the drying shrinkage of cement mortars .....	106
3.5.5. Effect of a cement of different types on the drying shrinkage of cement mortars .....	108
3.6. The impact of chemical admixtures and mineral additives on the drying shrinkage of cement mixtures with design technological properties .....	110
3.7. Conclusions of the Chapter 3.....	116
GENERAL CONCLUSIONS .....	119
REFERENCES .....	121
LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION.....	135
SUMMARY IN ENGLISH.....	137
ANNEXES <sup>2</sup> .....	153
Annex A. Flow curves of Portland cement paste with different concentration of cement particles in it .....	155
Annex B. Flow curves of Portland cement paste modified by chemical admixtures .....	156

---

<sup>2</sup> The annexes are supplied in the attached compact disc.

Annex C. Flow curves of Portland cement paste modified by mineral additives .....	159
Annex D. Author's declaration of integrity .....	160
Annex E. The co-authors' agreements for providing the materials of the joint publications in the thesis .....	161
Annex F. Copies of the scientific publications by the author on the topic of the thesis .....	162

---

# Ivadas

## Problemos formulavimas

Naudojant naujas betonavimo darbų arba betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų gamybos technologijas (transportavimą siurbliais, bevibracinį formavimą ir kt.) labai svarbios betono mišinių reologinės savybės, tokios kaip mišinio klampa, ribiniai šlyties įtempiai ir mišinių tiksotropiškumas, arba sugebėjimas atstatyti savo struktūrą ir klampą po mechaninio poveikio (vibravimo, intensyvaus maišymo ir kt.). Minėtos mišinių charakteristikos priklauso nuo skirtingų technologinių sąlygų, t. y. mišinių klojimo ir tankinimo parametrų betonavimo proceso metu, ir šiuo metu nėra vertinamos. Konstrukcijose, turinčiose didelį atvirą paviršių (grindų aikštelės, kelių dangos, rezervuarai, atraminės sienelės ir kitos plonasienės konstrukcijos), dėl traukumo deformacijų kietėjimo metu atsiranda plyšių, norint jų išvengti reikia nustatyti traukumo deformacijas, vertinant cheminių įmaišų, kartu ir traukumą mažinančių, bei mineralinių priedų poveikį. Norint projektuoti betono mišinius, tinkančius tokioms technologijoms, reikia tinkamai įvertinti įvairių cheminių įmaišų ir mineralinių priedų, kurie plačiai naudojami, poveikį mišinių reologinėms savybėms ir traukumui kietėjimo metu.

## Darbo aktualumas

Pastaruoju metu visame pasaulyje yra plačiai naudojami modifikuoti cementiniai mišiniai su įvairiomis cheminėmis įmaišomis ir (arba) aktyviaisiais mineraliniais priedais, tokiais kaip lakieji pelenai, granuluotas aukštakrosnių šlakas,  $\text{SiO}_2$  mikrodulkės, kurie keičia mišinių ir technologines savybes, ir cemento hidratacijos procesus, kartu ir traukumą bei sukietėjusio betono savybes.

Disertacijoje nagrinėjamas skirtingų cheminių įmaišų ir mineralinių priedų plastifikavimo efektyvumas bei jo įtaka projektinių technologinių savybių cementinių mišinių džiūstamojo traukumo deformacijoms kietėjimo metu. Gautus tyrimų rezultatus galima panaudoti projektuojant ir betonuojant didelių matmenų betonines ir gelžbetonines konstrukcijas.

## Tyrimų objektas

Cementiniai mišiniai, modifikuoti skirtingomis cheminėmis įmaišomis ir mineraliniais priedais, skirti didelio atvirojo paviršiaus konstrukcijoms betonuoti.

## Darbo tikslas

Ištirti cheminių įmaišų ir mineralinių priedų plastifikavimo efektyvumą ir poveikį cementinių mišinių džiūstamojo traukumo deformacijoms, esant skirtingoms mišinių naudojimo technologinėms sąlygoms.

## Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Nustatyti cheminių įmaišų ir mineralinių priedų poveikį cementinių tešlų reologinėms savybėms ir tiksotropiškumui, esant skirtingoms technologinėms sąlygoms.
2. Nustatyti cheminių įmaišų ir mineralinių priedų poveikį cementinių mišinių džiūstamojo traukumo deformacijoms.
3. Nustatyti vandens kiekio, cemento tešlos kiekio ir oro kiekio poveikį cementinių mišinių džiūstamojo traukumo deformacijoms.

4. Įvertinti cheminių įmaišų ir mineralinių priedų plastifikavimo efektyvumo įtaką projektinių technologinių savybių cementinių mišinių džiūstamajam traukumui.

## Tyrimų metodika

Cementinių tešlų reologinės savybės buvo tiriamos rotaciniu reometru su bendraašiais cilindrais. Pagal autoriaus sudarytą bandymo režimą, keičiant šlyties greitį arba šlyties įtempius, buvo nustatomos tešlų dinaminės (ribiniai šlyties įtempiai ir plastinė klampa) ir statinės (statiniai ribiniai šlyties įtempiai) reologinės savybės. Pagal plotą tarp statinių ir dinaminių ribinių šlyties įtempių kreivių buvo išreikštas struktūros atsistatymo rodiklis, skirtas tešlų tiksotropiškumui įvertinti. Cementinių skiedinių technologinių savybių tyrimams taikyti standartizuoti bandymo metodai, skirti nustatyti mišinio tankį, oro kiekį ir sklidumą.

Cementinių mišinių džiūstamasis traukumas buvo vertintas pagal bandinių, laikomų specialiomis kietėjimo sąlygomis (kai aplinkos oro temperatūra 20 °C, santykinė oro drėgmė  $40 \pm 5$  %), ilgio pokyčius.

## Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie medžiagų inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Naudojant plastifikavimo efektyvumo ir struktūros atsistatymo rodiklio charakteristikas nustatyta cheminių įmaišų ir mineralinių priedų įtaka cementinių mišinių džiūstamojo traukumo deformacijoms ir plastinio stiprumo pokyčiams, esant skirtingoms technologinėms sąlygoms.
2. Išvestos cementinių mišinių su cheminėmis įmaišomis ir mineraliniais priedais, vertinant jų plastifikavimo efektyvumą, džiūstamojo traukumo deformacijų skaičiavimo lygtys.

## Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Darbo rezultatai taikytini projektuojant ir statant betonines ir gelžbetonines konstrukcijas su dideliu atviru paviršiumi (grindų aikštelės, kelių dangos, rezervuarai, atraminės sienelės bei kitos plonasisienės konstrukcijos). Pagal darbo rezultatus galima projektuoti atstumus tarp deformacinių (traukumo) siūlių tokiose konstrukcijose. Panaudojus chemines įmaišas ir (arba) mineralinius priedus ga-

lima padidinti atstumus minėtose konstrukcijose tarp deformacinių siūlių arba betonuoti besiūles konstrukcijas.

## Ginamieji teiginiai

1. Cementinio mišinio struktūros atsistatymo rodiklis, kuriuo vertinamas mišinio tiksotropiškumas ir gebėjimas atlaikyti apkrovas, priklauso nuo cemento dalelių turinės koncentracijos mišinyje ir cheminių įmaišų ar mineralinių priedų tipo bei kiekio.
2. Cementinio mišinio plastifikavimo efektyvumas priklauso nuo cheminių įmaišų ir (arba) mineralinių priedų tipo ir kiekio, tačiau nepriklauso nuo nominaliojo vandens kiekio mišinyje.
3. Plastifikavimo efektyvumo dydis keičia vandens poreikį mišinyje ir betono džiūstamojo traukumo deformacijas kietėjimo metu. Mažas cementinio mišinio traukumo deformacijas galima pasiekti su maksimaliu plastifikavimo efektyvumu.

## Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tema yra atspausdinti 6 moksliniai straipsniai: vienas – mokslo žurnale, įtraukta į *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazės leidinius, turinčius citavimo rodiklį (Skrupkiūnas *et al.*, 2016); trys – tarptautinių duomenų bazių leidiniuose (Macijauskas ir Gailius, 2013; Macijauskas ir Girskas, 2017; Skrupkiūnas *et al.*, 2018); du – konferencijų straipsnių rinkiniuose (Macijauskas ir Skrupkiūnas, 2017; Macijauskas ir Skrupkiūnas, 2018).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti penkiose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- 5-ojoje tarptautinėje konferencijoje *International Conference Binders and Materials* (ICBM 2017), 2017 m., Čekijoje;
- 5-ojoje tarptautinėje konferencijoje *International Conference on Metallurgy Technology and Materials* (ICMTM 2017), 2017 m., Kinijoje;
- 12-ojoje tarptautinėje konferencijoje *Modern Building Materials, Structures and Techniques*, 2016 m., Vilniuje;
- 19-ojoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje *Mokslas – Lietuvos ateitis*, 2016 m., Vilniuje;
- 18-ojoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje *Mokslas – Lietuvos ateitis*, 2015 m., Vilniuje.

## Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, literatūros ir šaltinių bei autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai, santrauka anglų kalba ir šeši priedai.

Disertacijos apimtis su santrauka yra 152 puslapių (neįskaitant priedų), tekste yra 55 paveikslai, 22 lentelės, 21 formulė. Rašant disertaciją buvo panaudoti 198 literatūros šaltiniai.





---

# **Cheminių įmaišų ir mineralinių priedų poveikio cementinių mišinių reologinėms savybėms ir traukumui analizė**

Šiame skyriuje analizuojama cementinių mišinių reologinė elgsena ir jos charakteristikos, aptarti ir aprašyti taikomi metodai mišinių tiksotropiškumui įvertinti. Išanalizuotas skirtingų veiksnių poveikis ir cementinių mišinių reologinėms charakteristikoms bei tiksotropiškumui, ir kietėjančių mišinių džiūstamąjo traukumo deformacijoms.

Šio skyriaus medžiaga paskelbta trijuose straipsniuose (Skripkiūnas *et al.*, 2016; Macijauskas ir Skripkiūnas, 2018; Skripkiūnas *et al.*, 2018) ir pristatyta dviejose mokslinėse konferencijose.

## **1.1. Struktūrinių cementinių mišinių reologinė elgsena ir jos charakteristikos**

Laminarinio tekėjimo metu struktūrinį cementinį mišinį veikiant šlyties jėga mišinio viršutinio sluoksnio tekėjimo greitis yra didesnis, palyginti su apatiniu.

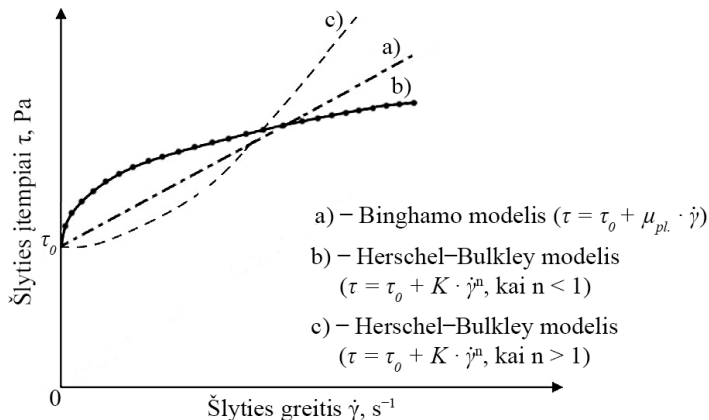
Tuomet sluoksnis, nutolęs dukart didesniu atstumu nuo nejudančio, juda dvigubai didesniu greičiu (Klovas, 2016). Cementinių mišinių deformacija veikiant šlyties jėgai išreiškiama skirtingų sluoksnių santykine deformacija (Yahia *et al.*, 2016). Darant prielaidą, kad mišinio sluoksnio dalelės  $t = 0$  laiko momentu yra  $z$  ir  $z + dz$  atstumu nuo nejudančio apatinio sluoksnio, o  $t$  laiko momentu dalelės atitinkamai pajuda  $u(z, t)$  ir  $u(z + dz, t)$  atstumu, kur  $z$  ir  $z + dz$  – dalelių vieta nejudančio apatinio sluoksnio atžvilgiu, šlyties deformacija apskaičiuojama pagal (1.1) formulę (Yahia *et al.*, 2016):

$$\gamma(z, t) = \frac{u(z + dz, t) - u(z, t)}{dz} = \frac{du(z, t)}{dz}. \quad (1.1)$$

Pažymėtina, kad pats poslinkis  $u(x, t)$  neturi įtakos šlyties deformacijai, tačiau įtakos turi poslinkio pokytis pereinant nuo vieno į kitą betarpiškai artimą sluoksnį. Tai išreiškiama šlyties greičiu, kuris yra šlyties deformacijos išvestinis dydis nuo laiko. Šlyties greitis apskaičiuojamas pagal (1.2) formulę:

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}, (s^{-1}). \quad (1.2)$$

Cementinio mišinio reologinė elgsena vertinama pagal gautą tekėjimo kreivę (veikiant mišinį šlytimi), vaizduojančią šlyties įtempį ( $\tau$ ) priklausomybę nuo šlyties greičio ( $\dot{\gamma}$ ) (Daukšys ir Skripkiūnas, 2015; Klovas, 2016).

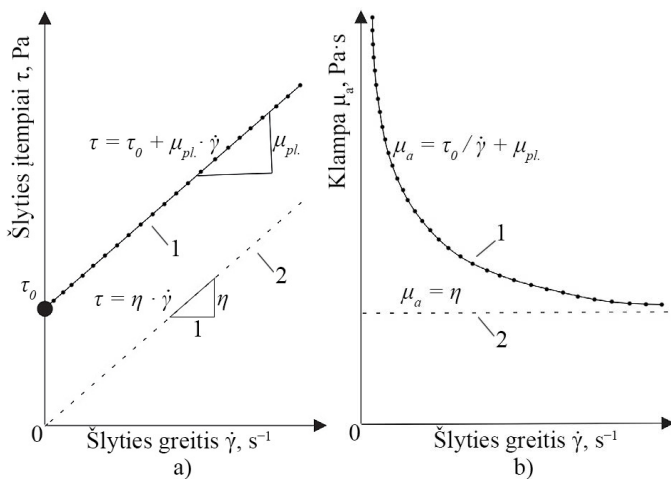


**1.1 pav.** Cementinių mišinių reologinės tekėjimo kreivės (Yahia *et al.*, 2016):  $\tau_0$  – (dinaminiai) ribiniai šlyties įtempiai;  $\mu_{pl}$  – plastinė klampa;  $K$  – konsistencijos rodiklis;  $n$  – šlyties greičio indeksas; a) – binghamiškas mišinys; b) – pseudoplastiškas mišinys; c) – dilatantiškas mišinys

**Fig. 1.1.** Rheological flow curves of cement mixtures (Yahia *et al.*, 2016):  $\tau_0$  – (dynamic) yield stresses;  $\mu_{pl}$  – plastic viscosity;  $K$  – consistency index;  $n$  – shear rate index; a) – Bingham mixture; b) – pseudoplastic mixture; c) – dilatant mixture

Paprastai, priklausomai nuo mišinio reologinės elgsenos, tekėjimo kreivei aprašyti taikomi pagrindiniai reologiniai modeliai (Yahia *et al.*, 2016): Binghamo, modifikuoto Binghamo ir Herschel–Bulkley. Struktūrinių skysčių – cementinių mišinių – tekėjimo kreivės ir jas aprašantys reologiniai modeliai bei jų lygtys pateiktos 1.1 paveiksle.

Cementiniai mišiniai pagal savo reologinę elgseną dažnai priskiriami binghamiškiems struktūriniams skysčiams, kuriems, kitaip nei niutoniniams skysčiams, būdingos dvi fundamentalios reologinės charakteristikos – (dinaminiai) ribiniai šlyties įtempiai ( $\tau_0$ ) ir plastinė klampa ( $\mu_{pl}$ ) (Daukšys ir Skripkiūnas, 2015; Yahia *et al.*, 2016; Galicia-Aldama *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2019a).



**1.2 pav.** Niutoninio skysčio ir binghamiškojo struktūrinio skysčio reologinė elgsena (Yahia *et al.*, 2016): a) – tekėjimo kreivių principinės schemos; b) – klampos kreivių principinės schemos;  $\tau_0$  – (dinaminiai) ribiniai šlyties įtempiai;  $\mu_{pl}$  – plastinė klampa;  $\eta$  ir  $\mu_a$  – šlyties įtempiai su atitinkamu šlyties greičiu santykis (klampa); 1 – binghamiškasis struktūrinis skystis; 2 – niutoninis skystis

**Fig. 1.2.** Rheological behaviour of Newtonian fluid and Bingham structural fluid (Yahia *et al.*, 2016): a) – schematic diagrams of the flow curves; b) – schematic diagrams of the viscosity curves;  $\tau_0$  – (dynamic) yield stresses;  $\mu_{pl}$  – plastic viscosity;  $\eta$  and  $\mu_a$  – ratio of shear stress to respective shear rate (viscosity); 1 – Bingham structural fluid; 2 – Newtonian fluid

1.2 paveiksle matoma, kad niutoniniams skysčiams būdinga tik viena reologinė savybė – klampa  $\eta$ , išreiškiama santykiu tarp šlyties įtempio ir šlyties greičio, nepriklausanti nuo šlyties greičio. Šių skysčių tekėjimas aprašomas (1.3) lygtimi pagal reologinį Niutono modelį (Yahia *et al.*, 2016):

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}, \quad (1.3)$$

čia  $\tau$  – šlyties įtempiai, Pa;  $\eta$  – šlyties įtempių su atitinkamu šlyties greičiu santykis (klampa), Pa·s;  $\dot{\gamma}$  – šlyties greitis, s<sup>-1</sup>.

Palyginti su niutoniniais skysčiais, binghamiškieji struktūriniai skysčiai pradeda tekėti ne iš karto, o tik suardant susiformavusios vidinės struktūros ryšius – viršijus kritinę šlyties įtempių, veikiančių skystį, ribą (Klovas, 2016; Skripkiūnas *et al.*, 2016). Todėl jiems būdinga dar viena reologinė savybė – (dinaminiai) ribiniai šlyties įtempiai ( $\tau_0$ ). Yahia *et al.* (2016) ir Xu *et al.* (2019a) teigia, kad struktūriniams skysčiams – cementiniams mišiniams – būdingi ribiniai šlyties įtempiai, o juos viršijus tekantieji pastovia klampa priskiriami binghamiškiems struktūriniams skysčiams (1.2 pav.). Šių mišinių tekėjimas aprašomas (1.4) lygtimi pagal reologinį Binghamo modelį (Xu *et al.*, 2019a):

$$\tau = \tau_0 + \mu_{pl} \cdot \dot{\gamma}, \quad (1.4)$$

čia  $\tau$  – šlyties įtempiai, Pa;  $\tau_0$  – (dinaminiai) ribiniai šlyties įtempiai, Pa;  $\mu_{pl}$  – plastinė klampa, Pa·s;  $\dot{\gamma}$  – šlyties greitis, s<sup>-1</sup>.

Tik esant nedideliams šlyties greičiams, struktūrinių skysčių – cementinių mišinių – reologinės tekėjimo kreivės įgauna tiesišką pavidalą (Yahia *et al.*, 2016). Kitu atveju, didinant šlyties greitį, mišinių kreivės įgauna netiesišką pavidalą – pasireiškia mišinių pseudoplastiška arba dilatantiška reologinė elgsena, kurios metu mišinių klampa atitinkamai mažėja ir didėja (Xu *et al.*, 2019a). Tokioms kreivėms aprašyti taikomi modifikuoto Binghamo arba Herschel–Bulkley reologiniai modeliai (Klovas, 2016; Daukšys ir Skripkiūnas, 2018; Xu *et al.*, 2019a). Modifikuoto Binghamo reologinio modelio netiesinė (1.5) lygtis užrašoma taip (Qian ir Kawashima, 2018):

$$\tau = \tau_0 + \mu_{pl} \cdot \dot{\gamma} + c \cdot \dot{\gamma}^2, \quad (1.5)$$

čia  $c$  – konstanta, Pa·s<sup>2</sup>.

Herschel–Bulkley reologinio modelio netiesinė (1.6) lygtis užrašoma taip (Xu *et al.*, 2019a):

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (1.6)$$

čia  $K$  – konsistencijos rodiklis, Pa·s;  $n$  – tiksotropiškumo rodiklis (tikotropiškumo, kai  $n < 1$ ; dilatantiškumo, kai  $n > 1$ ) arba šlyties greičio indeksas.

Pažymėtina, kad tuo atveju, kai  $n > 1$ , pradžioje (kai šlyties greičiai maži) stebimas pseudoplastiškas struktūrinio mišinio tekėjimas dėl (dinaminių) ribinių šlyties įtempių, tačiau toliau didinant šlyties greitį keičiasi reologinė elgsena iš pseudoplastiškos į dilatantišką (Yahia *et al.*, 2016). Xu *et al.* (2019a) teigia, kad binghamiškojo struktūrinio skysčio reologinis modelis yra atitinkamas Herschel–Bulkley struktūrinio skysčio modelio atvejis, kai  $n = 1$ , viršijant (dinaminis) ribinius šlyties įtempius skysčio klampa nekinta. Singh ir Singh (2018), Jiao *et al.* (2018) bei Feys ir Asghari (2019) nustatė, kad kai yra didelė

kietųjų dalelių koncentracija mišiniuose, cementiniai mišiniai – tešlos, skiediniai, betono mišiniai – pasižymi dilatantiška reologine elgsena, kitu atveju – pseudoplastiška. Wallevik *et al.* (2015), Klovas (2016), Daukšys ir Skripkiūnas (2018), Xu *et al.* (2019a) teigia, kad iš daugybės skirtingų reologinių modelių tiesinis Binghamo ir netiesinis modifikuoto Binghamo arba Herschel–Bulkley modelis yra plačiausiai ir dažniausiai taikomas cementinių mišinių tekėjimo savybėms nustatyti.

Praktiškai cementinio mišinio reologinės elgsenos pagrindinės charakteristikos nustatomos netiesiogiai: ribiniai šlyties įtempiai – mišinio slankumu (cm), klampa – Vebe rodikliu (s) (Klovas, 2016). Struktūrinių skysčių ribinių šlyties įtempių nustatymas yra sudėtingas ir komplikotas (Klovas, 2016; Daukšys ir Skripkiūnas, 2018; Xu *et al.*, 2019a). Todėl struktūrinių skysčių reologinės savybės dažniausiai nustatomos ekstrapoliuojant reologinę tekėjimo kreivę iki nulio šlyties greičio. Be to, tiek ribinių šlyties įtempių, tiek klamos nustatymo tikslumas priklauso nuo parinkto reologinio modelio (Wallevik *et al.*, 2015; Yahia *et al.*, 2016), apibūdinant gautą šlyties įtempių nuo šlyties greičio reologinę tekėjimo kreivę, ir reometro matavimo sistemos geometrinių parametrų (Wallevik *et al.*, 2015; Klovas, 2016) bei cementinių mišinių tekėjimo elgsenos (Xu *et al.*, 2019a). Klovas (2016) teigia, kad atliekant bandymus su cemento tešlomis gaunami geriausi rezultatai. Mokslininkas taip pat teigia, kad didinant betono stambiojo užpildo kiekį, didėja bandymo rezultatų sklaida dėl didėjančios trinties įtakos.

Cementinių mišinių reologinė elgsena ir jos charakteristikos nustatomos naudojant skirtingos konstrukcijos reometrus (Klovas, 2016). Su daugeliu šių įrenginių šlyties įtempių ir šlyties greičio tiesiogiai nustatyti negalima, kadangi jų matavimo sistemą dažnai sudaro koncentriški cilindrai arba besisukančios lygiagrečios plokštelės (Wallevik *et al.*, 2015; Feys *et al.*, 2018), kuriais matuojamas sukimosi momentas ir kampinis greitis. Pažymėtina, kad sukimosi momento ir kampinio greičio reikšmės gali būti konvertuotos į šlyties įtempius ir šlyties greitį (Feys *et al.*, 2018). Plačiausiai naudojamas rotacinis reometras su bendraašiais cilindrais (Wallevik *et al.*, 2015; Skripkiūnas *et al.*, 2016; Klovas, 2016; Feys *et al.*, 2018; Xu *et al.*, 2019a). Šiuo reometru galima išmatuoti ne vieną skirtingą parametą: mišinio dinامينius ir statinius (esant ramybės būsenos) ribinius šlyties įtempius, plastinę klampą, tiksotropiškumą, dilatantiškumą, atsparumą išsisluoksniavimui ir kt.

Nustatant betono mišinių ir kitų cementinių mišinių – tešlų ir skiedinių – reologinę elgseną ir jos charakteristikas, reometru šlyties greitis parenkamas pagal mišinių naudojimo paskirtį. Skirtinguose technologiniuose mišinio procesuose paprastai yra taikomi tokie didžiausi šlyties greičiai (Yahia *et al.*, 2016): maišant mišinį betonvežėje arba liejant, arba išpilant –  $10 \text{ s}^{-1}$ ; transportuojant mišinį

vamzdžiais aukšto slėgio siurbliu –  $20\text{--}40\text{ s}^{-1}$ ; šlyjant mišinį Tattersallio MKIII įrenginio arba BML reometro matavimo sistemoje, atitinkamai –  $5$  ir  $10\text{ s}^{-1}$ .

## 1.2. Mikromechaninė cementinių mišinių elgsena

Cementinė suspensija – cemento tešla – turi didelę įtaką betono mišinio reologinei elgsenai ir jos charakteristikoms. Nagrinėjant mikromechaninę cementinės suspensijos su skirtingomis betono cheminėmis įmaišomis ir (arba) mineraliniais priedais betonui elgseną, svarbu įvertinti įmaišų ir (arba) priedų įtaką suspensijos stabilumui, kurį lemia pusiausvyros balansas tarp suspensijoje veikiančių jėgų (Yahia *et al.*, 2016). Didžiausią įtaką turi šios cementinėje suspensijoje (tešloje) veikiančios jėgos (Yahia *et al.*, 2016): hidrodinaminės, koloidinės jėgos, Brauno judėjimas, inercinės ir gravitacinės jėgos.

### 1.2.1. Cementinių mišinių ribiniai šlyties įtempiai

Ribiniai šlyties įtempiai susidaro dėl flokuluotoje cementinėje sistemoje (tešloje) tarp dalelių veikiančių Van der Valso traukos jėgų, susidariusių virš perkoliacijos ribos ( $\phi_{\text{perc}}$ ), ir elektrostatinė atostūmio jėgų (Bessaies-Bey *et al.*, 2018). Tačiau dėl flokuluotoje sistemoje didelės jonų koncentracijos elektrostatinė atostūmio jėgų stiprumas yra per mažas, kad nevyktų dalelių aglomeracija. Apskaičiuota, kad suspensijoje be dispergento minimalus atstumas tarp dalelių yra apie  $2\text{ nm}$ , nepriklausomai nuo jų dydžio (Yahia *et al.*, 2016). Taigi tik suardant sistemos struktūrą sudarančių dalelių ryšius cementinė sistema pradeda tekėti.

Cementinės suspensijos (tešlos) – su cheminėmis įmaišomis, pasižyminčiomis plastifikavimo efektu, ir be įmaišų – ribinių šlyties įtempių mechanizmą galima paaiškinti pagal YODEL modelį (angl. „Yield Stress mODEL“) (Flatt ir Bowen, 2006). Šiuo modeliu bendra priklausomybė kiekybiškai susieti atskiri fiziniai parametrai, turintys įtakos suspensijų ribinių šlyties įtempių susidarymui. Dėl to galima tiksliai prognozuoti cementinės suspensijos (tešlos) ribinių šlyties įtempių priklausomybę nuo koloidinių dalelių koncentracijos suspensijoje, tarp dalelių veikiančių jėgų ir dalelių dydžio bei granulometrijos (Jiao *et al.*, 2017). Be to, šis modelis gali būti taikomas ir polidispersinių smulkiųjų dalelių cementiniams mišiniams (Flatt ir Bowen, 2006; Yahia *et al.*, 2016).

Pagal YODEL modelį, aprašytą (1.7) lygtimi (Jiao *et al.*, 2017), išskiriami trys pagrindiniai veiksniai, turintys didžiausią įtaką ribiniams šlyties įtempiams. Pirmasis veiksnys įvertina smulkiųjų dalelių charakteristikas. Šį veiksnį perteikia (1.7) lygties dalis, kuri sudaryta iš: koeficiento ( $m$ ), priklausančio nuo dalelių išsidėstymo pagal dydį; vidutinio dalelės dydžio ( $d$ ); kreivės spindulio dydžio, nubrėžto per dalelių kontaktų taškus ( $a^*$ ); Hamakerio konstantos ( $A_0$ ). Antrasis

veiksny įvertina atstumą tarp dalelių, kuriam didelę įtaką turi cheminės įmaišos, pasižyminčios plastifikavimo efektu. Lygtyje (1.7) šis atstumas išreikštas simboliu  $h$ . Trečiasis veiksnys įvertina dalelių koncentracijos ( $\varphi$ ) suspensijoje įtaką, kuri priklauso nuo didžiausios (sutankintos būklės) dalelių koncentracijos suspensijoje ( $\varphi_m$ ) ir perkoliacijos ribos ( $\varphi_{perc}$ ).

$$\tau_0 \cong m \frac{A_0 \cdot a^*}{d^2 \cdot h^2} \cdot \frac{\varphi^2 \cdot (\varphi - \varphi_{perc})}{\varphi_m \cdot (\varphi_m - \varphi)}, \quad (1.7)$$

čia  $m$  – koeficientas, priklausantis nuo dalelių išsidėstymo pagal dydį;  $d$  – vidutinis dalelės dydis (skersmuo),  $m$ ;  $a^*$  – kreivės spindulio, nubrėžto per dalelių kontaktų taškus, dydis,  $m$ ;  $A_0$  – Hamakerio konstanta,  $J$ ;  $h$  – vidutinis atstumas tarp dalelių,  $m$ ;  $\varphi$  – dalelių koncentracija suspensijoje;  $\varphi_m$  – didžiausia (sutankintos būklės) dalelių koncentracija suspensijoje;  $\varphi_{perc}$  – perkoliacijos riba.

Yahia *et al.* (2016) ir Jiao *et al.* (2017) teigia, kad cheminėms įmaišoms, kurios pasižymi plastifikavimo efektu, adsorbuojantis ant cemento dalelių, cementinės suspensijos ribiniai šlyties įtempiai, flokuliacijos laipsnis bei tarp dalelių veikiančios traukos jėgos sumažėja dėl suspensijoje padidėjusio atstumo ( $h$ ) tarp dalelių. Atstumo ( $h$ ) tarp dalelių padidėjimo dydis priklauso nuo cheminės įmaišos, pasižyminčios plastifikavimo efektu, sudarančių polimerų konformacijos ir jų adsorbcijos ant cemento dalelių paviršiaus (Yahia *et al.*, 2016; Marchon *et al.*, 2016). Adsorbcijos dydis priklauso nuo įmaišų molekulinės struktūros (Marchon *et al.*, 2013).

### 1.2.2. Klampa ir jos įtaka cementinių mišinių pseudoplastiškai ir dilatantiškai reologinei elgsenai

Mokslininkai nustatė, kad cementinėse dispersinėse sistemose su cheminėmis įmaišomis, kurios pasižymi plastifikavimo efektu, pasireiškia pseudoplastiška reologinė elgsena, kai šlyties greičiai maži (Ma *et al.*, 2016; Erzengin *et al.*, 2018; Jiao *et al.*, 2018). Pseudoplastiškas struktūrinių skysčių tekėjimas pasireiškia, kai didėjant šlyties įtempiams asimetrinės dalelės skystyje pamažu orientuojasi (Klovas, 2016). Klovas (2016) teigia, kad „skysčio dalelės vietoj chaotiškų judesių, kuriuos atlieka ramios būsenos skystyje, savo didžiosiomis ašimis orientuojasi srovės kryptimi“. Siekiant geriau suprasti šio fenomenalaus reiškimo kilmę, Hot *et al.* (2014) pasiūlė likutinio klampumo koncepciją. Pagal šią koncepciją dispersinėje sistemoje veikiančių hidrodinaminių jėgų sąveika atskiriama nuo ribinių šlyties įtempių (Yahia *et al.*, 2016). Likutinis klampumas apskaičiuojamas pagal (1.8) lygtį (Hot *et al.*, 2014; Yahia *et al.*, 2016):

$$\mu_{res} = \left( \mu_a - \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} \right), \quad (1.8)$$

čia  $\mu_{res}$  – likutinis klampumas, Pa·s;  $\mu_a$  – šlyties įtempių su atitinkamu šlyties greičiu santykis (šlyties greičio funkcija), Pa·s;  $\tau_0$  – ribiniai šlyties įtempimai, Pa;  $\dot{\gamma}$  – šlyties greitis,  $s^{-1}$ .

Mokslininkai nustatė, kad jei šlyties greičiai maži, o plastifikuojančios įmaišos kiekis padidinamas, cementinės suspensijos (tešlos) klampumo disipacija sumažėja (Hot *et al.*, 2014; Yahia *et al.*, 2016). Tai pasireiškia tik intersticiniame skystyje tarp cemento dalelių. Nkinamubanzi *et al.* (2016) nustatė, kad klampumo disipacijos dydis priklauso nuo konformacijos adsorbuotų ir neadsorbuotų įmaišų, pasižyminčių plastifikavimo efektu, polimerų.

Daukšys ir Skripkiūnas (2015), Roussel *et al.* (2010), Ma *et al.* (2016), Erzengin *et al.* (2018), Jiao *et al.* (2018) plačiau ištyrė šlyties greičio įtaką cementinių suspensijų (tešlų) reologinei elgsenai. Nustatyta, kad didinant šlyties greitį suspensijų reologinė elgsena keičiasi iš pseudoplastiškos į dilatantišką. Be to, naudojant chemines įmaišas, kurios pasižymi efektyviu dispergavimo efektu, ir didinant jų kiekį, cementinių sistemų dilatantiškumas didėja (Roussel *et al.*, 2010; Jiao *et al.*, 2018). Yahia *et al.* (2016) teigia, kad tai didelės įtakos cementinių sistemų tekamumui neturi, išskyrus tuos atvejus, kai vyksta tam tikri technologiniai mišinio procesai – maišymas, pumpavimas ir ekstrūzija. Šių technologinių procesų metu padidėja energijos sąnaudos reikiamam cementinės sistemos tekamumui palaikyti (Daukšys ir Skripkiūnas, 2015). Mokslininkai dar iki šiol diskutuoja dėl cementinėse sistemose pasireiškiančio dilatantiškumo reiškinio kilmės ir pateikia keletą skirtingų teorijų (Roussel *et al.*, 2010; Daukšys ir Skripkiūnas, 2018). Pagal pirmąją teoriją teigiama, kad palyginti su Brauno judėjimu, hidrodinaminės klampiosios jėgos, lemiančios skysčio klasterių formavimąsi, labiau dominuoja ir lemia tolygesnį dalelių paskirstymą skystyje (Yahia *et al.*, 2016). Ši jėgų sąveikia išreiškia Peklė skaičiumi ir yra užrašoma (1.9) lygtimi (Yahia *et al.*, 2016; Erzengin *et al.*, 2018):

$$Pe_{\dot{\gamma}} = \eta_0 \cdot d^3 \cdot \frac{\dot{\gamma}}{k_B} \cdot T, \quad (1.9)$$

čia  $Pe_{\dot{\gamma}}$  – Peklė skaičius;  $\eta_0$  – terpės (skysčio) klampa, Pa·s;  $d$  – dalelės spindulys, m;  $k_B$  – Boltzmano konstanta, J/K;  $T$  – absoliutinė temperatūra, K;  $\dot{\gamma}$  – šlyties greitis,  $s^{-1}$ .

Roussel *et al.* (2010) nustatė, kad, viena vertus, flokuliuotoje sistemoje Brauno dalelių judėjimas nereikšmingas, palyginti su veikiančiomis traukos jėgomis tarp sistemos dalelių, kurių dydis kinta nuo 10 iki 50  $\mu m$ . Kita vertus, flokuliuotoje sistemoje mažėjant dalelių dydžiui, koloidinėms jėgoms, Brauno judėjimo ir traukos jėgų tarpusavio sąveika didėja (Yahia *et al.*, 2016). Siekiant įvertinti cementinėje tešloje dominuojančių jėgų pasiskirstymą, Roussel *et al.* (2010) apskaičiavo šlyties greičio kritinės reikšmės dydį ( $\dot{\gamma} = 10^{-3} s^{-1}$ ), kurį viršijus pasikeičia tešlos reologinė elgsena iš pseudoplastiškos į dilatantišką. Aps-



kaičiuotos reikšmės dydis daug mažesnis, palyginti su realiomis sąlygomis (eksperimentiškai) gautu šlyties greičio kritinės reikšmės dydžiu. Feys *et al.* (2009) ir Hot *et al.* (2014) nuomone, ši teorija prieštarauja jų gautiems tyrimų rezultatams. Mokslininkai nustatė, kad padidinus cheminių įmaišų, pasižyminčių plastifikavimo efektu, kiekį, šlyties greičio kritinės ribos reikšmė sumažėja ir cementinės sistemos dilatantiškumo intensyvumas padidėja.

Alternatyvi teorija teigia, kad dalelių inercinės jėgos cementinėje sistemoje labiau dominuoja, palyginti su klampiosiomis jėgomis (Feys *et al.*, 2009; Rousset *et al.*, 2010; Yahia *et al.*, 2016; Erzenegin *et al.*, 2018). Didėjant sistemos dalelių dydžiui, kritinė šlyties greičio reikšmė mažėja. Tai išreiškiama Reinoldso skaičiumi ir yra užrašoma (1.10) lygtimi (Yahia *et al.*, 2016):

$$Re = \rho_0 \cdot d^2 \cdot \frac{\dot{\gamma}}{\eta_0}, \quad (1.10)$$

čia  $\rho_0$  – terpės (skysčio) tankis,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\eta_0$  – terpės (skysčio) klampa,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $d$  – dalelės spindulys,  $\text{m}$ ;  $\dot{\gamma}$  – šlyties greitis,  $\text{s}^{-1}$ .

Palyginus kitų mokslininkų gautus rezultatus (Phan *et al.*, 2006; Daukšys *et al.*, 2010; Daukšys ir Skripkiūnas, 2015; Daukšys ir Skripkiūnas, 2018) galima teigti, kad didinant dalelių koncentraciją ( $\varphi$ ) cementinėje sistemoje, flokuotose sistemos dilatantiškumas ir jo didėjantis intensyvumas pasireiškia esant mažesniems šlyties greičiams. Be to, įvertinę anksčiau aptartą likutinį klampumą, mokslininkai nustatė, kad esant pastoviai dalelių koncentracijai ( $\varphi$ ) sistemoje, cementinės sistemos dilatantiškumo didėjimas nepriklauso nuo cheminės įmaišos, pasižyminčios plastifikavimo efektu, kiekio (Hot *et al.*, 2014; Yahia *et al.*, 2016). Tačiau cementinės sistemos dilatantiškumo didėjimas, esant didelės energijos maišymui, priklauso nuo sistemos dalelių susidūrimų arba tarp dalelių kontaktų atsirandančios trinties (Hot *et al.*, 2014).

Nuo 2000 m. moksliniuose tyrimuose pastebėta, kad padidinus šlyties greitį, polimerai (kai įmaiša pasižymi plastifikavimo efektu) negali pakankamai greitai atsiskirti nuo cemento dalelių paviršiaus, tačiau dalis jų atsiskiria. Tai lemia veikiančių jėgų tarp cemento dalelių padidėjimą dėl sumažėjusio dalelių paviršiaus ploto padengimo polimerais (Cyr *et al.*, 2000). Tačiau pažymėtina, kad padidinus polimerų kiekį, cementinėje sistemoje (tešloje) ant atsiradusio laisvojo dalelių paviršiaus ploto greitai vėl adsorbuojasi laisvieji polimerai (Cyr *et al.*, 2000; Yahia *et al.*, 2016). Taigi, Yahia *et al.* (2016) nuomone, cementinių sistemų dilatantiškumas tiesiogiai nepriklauso nuo cheminių įmaišų, pasižyminčių plastifikavimo efektu, prigimties. Tačiau stipriai disperguotose sistemose dilatantiškumas intensyviau pasireiškia dėl mažesnio pasiekiamo dalelių tūrinio kiekio (arba dalelių laisvojo paviršiaus ploto), ant kurio laisvieji polimerai galėtų adsorbuotis, kai šlyties greitis didelis. Be to, Fernandez (2015) nustatė, kad didėjant šlyties greičiui cementinės sistemos dilatantiškumas gali progresiškai didėti arba

pasireikšti tik tam tikrose šlyties greičio intervalo ribose. Mokslininkų nuomone, tai priklauso nuo trinties jėgų koncentracijos, pasireiškiančios tarp cemento dalelių kontaktų (Fernandez *et al.*, 2013; Fernandez, 2015).

### 1.2.3. Cementinių mišinių tiksotropiškumas

Cementinių mišinių tiksotropiškumas – tai fenomenali mišinių savybė keisti reologines savybes: mažinti klampą veikiant juos šlytimi arba šlyties greičiu ir atkurti buvusias reologines savybes poveikį nutraukus (Skripkiūnas, 2007; Klovas, 2016; Skripkiūnas *et al.*, 2016; Jiao *et al.*, 2017). González-Taboada *et al.* (2018) tiksotropiškumą apibūdina kaip grįžtamąjį, izoterminį ir nuo laiko trukmės priklausančią procesą. Pažymėtina, kad klampos kitimas dėl mišinio tiksotropiškumo – tai izoterminis procesas, todėl neturi būti sutapatinamas su klampos kitimu dėl mišinio temperatūros kitimo (González-Taboada *et al.*, 2018). Mišinio klampos kitimas laikomas taip pat nuo laiko trukmės priklausomu procesu, kadangi klampos kitimas pasireškia per tam tikrą laiko trukmę, o ne iškart paveikus mišinį šlytimi ar jį nutraukus (González-Taboada *et al.*, 2018). Be to, cementinių mišinių tiksotropiškumas neturi būti sutapatinamas su mišinių pseudoplastiškumu (Klovas, 2016). Skripkiūnas *et al.* (2016), Yahia *et al.* (2016) ir González-Taboada *et al.* (2018) teigia, kad tiksotropiškumas yra nuo laiko trukmės priklausančias procesas, kuris pasireiškia esant pastoviai šlyčiai ar šlyties greičiui, o pseudoplastiškumas nepriklauso nuo laiko trukmės, tačiau priklauso nuo šlyties greičio – didinant šlyties greitį mažėja mišinių klampa.

Cementinių mišinių tiksotropiškumas yra nuo laiko trukmės priklausančias grįžtamasis procesas. Žinoma, kad iškart po maišymo cemento dalelės mišinyje būna disperguotos. Ramybės būsenos metu mišinio cemento dalelės flokuluoja dėl veikiančių koloidinių traukos jėgų (įvertinant ir Brauno judėjimą) (Marchesini *et al.*, 2019). Taip pat mišinyje susiformuoja sąveikaujančių dalelių perkoliacijos (skverbties) struktūrinis tinklas, lemiantis mišinio klampos ir statinių ribinių šlyties įtempių padidėjimą (Yahia *et al.*, 2016). Tačiau, esant pastoviai šlyčiai ar šlyties greičiui, mišinio klampa palaipsniui mažėja, kol pasiekia pusiausvyros būseną. Mišinio statiniai ribiniai šlyties įtempiai pasiekia dinaminių ribinių šlyties įtempių reikšmę. Tai vyksta dėl vidinių ryšių suardymo tarp flokuotų cemento dalelių ir ryšių tarp kietosios fazės dalelių susilpnėjimo (Yahia *et al.*, 2016; Ouyang *et al.*, 2016; Marchesini *et al.*, 2019). Klovas (2016) teigia, kad tiksotropiškumas dažniausiai pasireiškia cementinių mišinių, turinčių didelį smulkiųjų dalelių kiekį, vibravimo metu, kai mišinių struktūra pereina į silpnai struktūrišką arba bestruktūrę. Struktūros suardymo laipsnis priklauso nuo vibravimo amplitudės ir dažnio (Klovas, 2016).

Cementinių mišinių tiksotropiškumas pasireiškia esant grįžtamiesiems ir negrįžtamiesiems struktūriniams suardymams, iš kurių tik pirmasis yra susijęs su

tiksotropiškumu (Yahia *et al.*, 2016). Siekiant geriau suprasti cementinių mišinių tiksotropiškumo mechanizmą turi būti vertinamas ir grįžtamasis „likutinių“ statinių ribinių šlyties, ir negrįžtamasis dinaminių ribinių šlyties įtempių kitimas (Wallevik, 2009; Ouyang *et al.*, 2016; Marchesini *et al.*, 2019; Jiao *et al.*, 2017). Pastarasis vyksta dėl cemento hidratacijos reakcijų (Skripkiūnas *et al.*, 2016). Ilgėjant cemento hidratacijos reakcijų trukmei, cementinių mišinių dinaminiai ribiniai šlyties įtempiai didėja – negrįžtamai mažėja mišinių klijumas. Taip pat susidaro nauji hidratacijos reakcijų produktai, kurie didina flokuluotos mišinio struktūros koheziškumą (Skripkiūnas *et al.*, 2016). 1983 m. Tattersall ir Banfill (1983) įvedė „negrįžtamojo struktūrinio suardymo“ terminą, pažymėdami faktą, kad cementiniai mišiniai pasižymi nuo šlyties priklausoma reologine elgsena. Yuan *et al.* (2017), Yahia *et al.* (2016), Lecompte ir Perrot (2017) ir Jiao *et al.* (2017) nustatė, kad esant didelei šlyčiai (maišant mišinį betono maišyklėje), cementinių mišinių dinaminiai ribiniai šlyties įtempiai ne visiškai atsistato iki prieš tai buvusių dėl cemento hidratacijos poveikio. Tačiau „likutiniai“ statiniai ribiniai šlyties įtempiai susiję su susiformavusia mišinio mikrostruktūra, kuri gali būti suardoma veikiant šlyčiai ir atsistato ramybės būsenos metu (Yahia *et al.*, 2016; Jiao *et al.*, 2017; Marchesini *et al.*, 2019). Jiao *et al.* (2017) nuomone, tai atitinka tiksotropiškumui būdingą elgseną. Taigi nuo laiko trukmės priklausančias reologines cementinių mišinių savybes paaiškina skirtingi veiksniai: negrįžtamasis struktūrinis suardymas, tiksotropiškumas bei hidratacija.

Yahia *et al.* (2016) atliko išsamią literatūros apžvalgą ir nustatė, kad iki šiol labai trūksta duomenų apie skirtingų betono cheminių įmaišų, taip pat mineralinių priedų betonui įtaką visoms nuo laiko trukmės priklausančioms cementinių mišinių reologinėms savybėms.

### 1.3. Cementinių mišinių reologinę elgseną ir jos charakteristikas lemiantys veiksniai

Žinoma, kad cementinis mišinys (betono mišinys) yra pagamintas iš daugelio skirtingų dalelių, kurių skersmuo kinta nuo kelių mikrometrų (cemento ir mineralinių priedų betonui) ar net nanometrų (esant SiO<sub>2</sub> mikrodulkėms mišinyje) iki keleto dešimčių milimetrų (smulkiojo ir stambiojo užpildo). Kaip pastebėjo Skripkiūnas (2007), betono mišinys yra trijų lygių dvikomponenčių dispersinių sistemų – cementinės teslos, skiedinio ir pačio betono mišinio – struktūra. Be to, betono mišinio reologinės charakteristikos kinta su laiku dėl grįžtamųjų fizikinių reiškinių (mišinio smulkiųjų dalelių flokuliacijos) ir negrįžtamųjų cheminių reakcijų, vykstančių dėl cemento hidratacijos (Ahari *et al.*, 2015a; Ye *et al.*, 2019; Marchesini *et al.*, 2019). Todėl galima teigti, kad reologinę elgseną ir jos charakteristikas lemia ne tik cementinio mišinio struktūra, bet ir kiti veiksniai.

### **1.3.1. Technologinių procesų įtaka cementinių mišinių reologinėms charakteristikoms**

Skirtinguose technologinių procesų etapuose cementinio mišinio (betono mišinio) technologinės ir reologinės charakteristikos kinta, priklausomai nuo mišinių veikiančio proceso ir jo energijos poreikio. Kaip buvo minėta aukščiau (žr. 1.1 poskyrį), kiekvieno proceso metu mišinys veikiamas tik tam procesui būdingu šlyties greičiu.

Mokslininkai nustatė, kad mišinio maišymo intensyvumas ir jo trukmė (arba liekamas šlyties poveikis mišiniui) turi poveikį ne tik betono mišinio reologinėms charakteristikoms (Juilland *et al.*, 2012; Han ir Ferron, 2017), bet ir cemento hidratacijos kinetikai (Juilland *et al.*, 2012; Oblak *et al.*, 2013; Han ir Ferron, 2016). Han ir Ferron (2017) bei Juilland *et al.* (2012) nuomone, tai vyksta dėl jonų koncentracijos pokyčių cementinėje sistemoje, kurių metu keičiasi: cemento dalelių paviršiuje vykstančių cheminių reakcijų intensyvumas; pačių cemento dalelių paviršiaus morfologija ir esant cheminėms įmaišoms sistemoje – polimerų adsorbcija. Dėl to nuosekliai atliekant reologinius tyrimus skirtingiems cementinio mišinio struktūriniams lygiams – nuo betono mišinio iki tešlos, ar atvirkščiai, svarbu, kad mišinį veikiančio technologinio proceso (maišymo) energijos kiekis būtų išlaikytas vienodas visuose mišinio struktūriniuose lygiuose (Han ir Ferron, 2017). Priešingu atveju, cementinių mišinių reologinė elgsena ir jos charakteristikos skirsis. Be to, reikia įvertinti ir tai, kad technologinių procesų metu, veikiant betono mišinį šlytimi, mišinyje esančio smulkiojo ir stambiojo užpildo deformuoti negalima. Todėl susidaro tam tikro dydžio šlyties greičio koncentracija, kuri padidėja tarp mišinio užpildo dalelių (Hafid *et al.*, 2015).

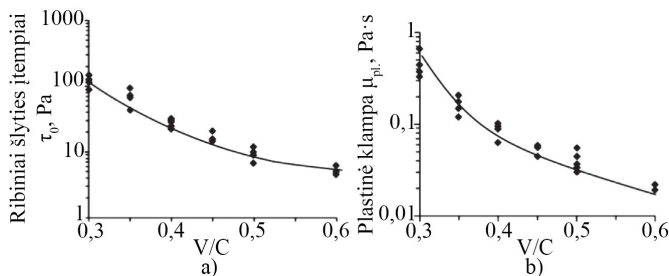
### **1.3.2. Kietųjų dalelių koncentracijos mišinyje įtaka cementinių mišinių ribiniams šlyties įtempiams ir plastinei klampai**

Daukšys ir Skripkiūnas (2015, 2018) teigia, kad kietųjų dalelių koncentracijos kiekis mišinyje yra svarbus veiksnys, kuris lemia cementinių mišinių reologinę elgseną ir jų reologines savybes.

Didinant V/C arba vandens kiekį ir išlaikant pastovų cemento kiekį mišinyje (mažinant kietųjų dalelių koncentraciją mišinyje), cementinio mišinio ribiniai šlyties įtempiai ir plastinė klampa mažėja (1.3 pav.) (Yahia *et al.*, 2016). Tokią pat priklausomybę nustatė ir kiti mokslininkai (Asghari *et al.*, 2016).

Klovas (2016) nustatė, kad ribiniai šlyties įtempiai ir plastinė klampa bei kitos reologinės mišinių savybės priklauso nuo skystosios fazės (vandens) kiekio ir vandens ryšio formos. Mokslininkas teigia, kad „ypač didelę įtaką joms daro

laisvasis vanduo, o chemiškai ir fiziškai surištas (adsorbcinis) vanduo neturi įtakos reologinėms mišinio savybėms“.



**1.3 pav.** Vandens kiekio mišinyje įtaka cementinio mišinio (tešlos) reologinėms savybėms (Yahia *et al.*, 2016): a) – ribiniams šlyties įtempiams; b) – plastinei klampa

**Fig. 1.3.** Influence of water content on the rheological properties of cement mixture (paste) (Yahia *et al.*, 2016): a) – on the yield stresses; b) – on the plastic viscosity

Žinoma, kad cementiniai mišiniai pasižymi didele kietųjų dalelių koncentracija mišinyje. Esant arti maksimalios kietųjų dalelių koncentracijos suspensijoje reikšmės ( $\varphi_{\max}$ ), suspensijos klampa gali būti apskaičiuota remiantis empiriniu Krieger–Dougherty modeliu (Kabagire *et al.*, 2019). Supaprastintą Krieger–Dougherty modelį suspensijoms galima aprašyti (1.11) lygtimi (Yahia *et al.*, 2016):

$$\mu(\varphi) = \mu_0 \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_{\max}}\right)^{-\eta \cdot \varphi_{\max}}, \quad (1.11)$$

čia  $\mu(\varphi)$  – suspensijos klampa, išreikšta suspensijos šlyties įtempių su šlyties greičiu (prie kurio gauti šlyties įtempiai) santykiu, Pa·s;  $\mu_0$  – skysčio (suspensijos terpės) klampa, išreikšta skysčio šlyties įtempių su šlyties greičiu (prie kurio gauti šlyties įtempiai) santykiu, Pa·s;  $\varphi$  – kietųjų dalelių tūrinė koncentracija suspensijoje;  $\eta$  – vidinė klampa suspensijoje, kuri priklauso nuo dalelių formos (sferinių dalelių  $\eta$  – 2,5 Pa·s, o cemento – nuo 4 iki 7 Pa·s (Kabagire *et al.*, 2017), Pa·s;  $\varphi_{\max}$  – maksimali kietųjų dalelių tūrinė koncentracija suspensijoje.

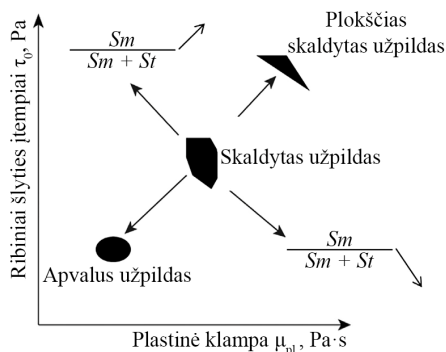
### 1.3.3. Cemento tešlos koncentracijos mišinyje įtaka cementinių mišinių reologinėms charakteristikoms

Daukšys *et al.* (2018) teigia, kad cementinį mišinį – betono mišinį galima nagrinėti kaip trijų savarankiškų dvikomponenčių dispersinių sistemų struktūrą. Tokiu atveju, betono mišinį galima apibrėžti kaip dispersinę sistemą, kurios skysto-

ji fazė yra cemento tešla (skiedinys), o kietoji – smulkusis ir (arba) stambusis užpildas.

Jiao *et al.* (2017) bei Wallevik O. H. ir Wallevik J. E. (2011) nustatė, kad betono mišinio reologinę elgseną lemia ne tik skystosios fazės reologinė elgsena, bet ir jos tūrinis kiekis mišinyje. Didinant perteklinę tešlos tūrinį kiekį mišinyje, kuris padidina atstumus tarp mišinio užpildo dalelių, betono mišinio ribiniai šlyties įtempiai mažėja, o plastinė klampa didėja, ir atvirkščiai (Wallevik O. H. ir Wallevik J. E., 2011).

Keičiant betono smulkiojo ar stambiojo užpildo tūrinį kiekį mišinyje (išlaikant pastovų bendrąjį užpildų tūrinį kiekį), betono mišinio reologinės savybės kinta skirtingai. Yardimci *et al.* (2014) nustatė, kad padidinus smulkiojo užpildo (smėlio) tūrinį kiekį mišinyje, betono mišinyje tarp stambiojo užpildo dalelių padidėja trintis bei tarp tešlos ir stambiojo užpildo dalelių sumažėja sukibimas.



**1.4 pav.** Užpildo dalelių formos ir kiekio mišinyje poveikis betono mišinio reologinėms savybėms reologinėje diagramoje (Yahia *et al.*, 2016):  $Sm$  – smulkiojo užpildo (smėlio) kiekis betono mišinyje;  $St$  – stambiojo užpildo kiekis betono mišinyje

**Fig. 1.4.** Impact of aggregate particle shape and amount in mixture on rheological properties of concrete mixture in the rheological diagram (Yahia *et al.*, 2016):  $Sm$  – the amount of fine aggregate (sand) in the concrete mixture;  $St$  – the amount of coarse aggregate in the concrete mixture

Remiantis Yahia *et al.* (2016) pateikta reologine diagrama (1.4 pav.), matoma, kad keičiant smulkiojo užpildo tūrinį kiekį mišinyje (išlaikant pastovų bendrąjį užpildų tūrinį kiekį), betono mišinio reologinės savybės kinta: didinant – ribiniai šlyties įtempiai didėja, o plastinė klampa mažėja, ir atvirkščiai. Tokį patį poveikį betono mišinio reologinėms savybėms pastebėjo ir kiti mokslininkai (Yardimci *et al.*, 2014; Jiao *et al.*, 2017). Be to, mokslininkai (Wallevik O. H. ir Wallevik J. E., 2011) nustatė, kad smulkiojo užpildo dalelių poveikis betono mišinio ribiniams šlyties įtempiams yra didesnis nei stambiojo.

Naudojant stambų užpildą su skaldytomis dalelėmis, kurios pasižymi netaisyklinga forma ir dideliu drėkinamuoju paviršiaus plotu bei jo šiurkštumu, betono mišinyje sumažėja didesnė laisvojo vandens kiekio dalis ir tarp tokių dalelių susidaro didesnė vidinė trintis, nei naudojant apvalių dalelių užpildą (Marčiukaitis, 2013). Padidėja ir cemento tešlos sukibimas su stambiojo užpildo dalelėmis. Tai lemia betono mišinio ribinių šlyties įtempių ir plastinės klamos padidėjimą (1.4 pav.). Be to, mokslininkai (Wallevik O. H. ir Wallevik J. E., 2011; Jiao *et al.*, 2017) nustatė, kad didinant stambiojo užpildo tūrinį kiekį mišinyje (išlaikant pastovų bendrąjį užpildų tūrinį kiekį), betono mišinio ribiniai šlyties įtempiai ir plastinė klampa taip pat didėja.

#### **1.3.4. Cemento tipo ir smulkumo įtaka cementinių mišinių reologinėms charakteristikoms**

Cemento charakteristikos, kurios turi didžiausią poveikį cementinių mišinių reologinėms savybėms, yra cemento dalelių išsidėstymas pagal dydį ir smulkumas bei cheminė ir mineralinė cemento sudėtis (Klovas, 2016).

Nustatyta, kad didinant portlandcemenčio smulkumą nuo 350 iki 600 m<sup>2</sup>/kg, tešlos ribiniai šlyties įtempiai didėja, o plastinė klampa mažėja, o kai cemento smulkumas 600 m<sup>2</sup>/kg – pasiekia mažiausią reikšmę (Mardani-Aghabaglou *et al.*, 2017). Tačiau dar labiau didinant cemento smulkumą, tešlos klampa didėja. Klamos sumažėjimą, kaip teigia Klovas (2016), lemia optimalus vandens pasiskirstymas cementinėje sistemoje ir tarp dalelių sumažėjusi vidinė trintis. Kai cemento smulkumas didesnis (>600 m<sup>2</sup>/kg), tarp cemento dalelių pradeda veikti molekulinės ir adhezinės jėgos, tai lemia tešlos plastinės klamos padidėjimą (Jiao *et al.*, 2017).

Dils *et al.* (2013) ištyrė skirtingo smulkumo cemento su skirtinga chemine sudėtimi poveikį ypač didelio stiprumo betono mišinių (esant vienodai konsistencijai) reologinėms savybėms. Nustatyta, kad esant cemento dideliame C<sub>2</sub>S ar C<sub>3</sub>S kiekiui, betono mišinių ribiniai šlyties įtempiai ir plastinė klampa atitinkamai didėja ir mažėja. Dils *et al.* (2013), Mardani-Aghabaglou *et al.* (2017) ir Barbosa *et al.* (2018) taip pat nustatė, kad esant cemento dideliame smulkumui, C<sub>3</sub>A ir šarmų kiekiui ir mažam sulfatų kiekiui (nuo 1 iki 3 % cemento masės), cementinių mišinių ribiniai šlyties įtempiai ir plastinė klampa padidėja – mišinių apdirbamumas pablogėja.

### 1.3.5. Cheminių įmaišų įtaka cementinių mišinių reologinėms charakteristikoms

Plastikliai ir superplastikliai – plačiausiai betono pramonėje naudojamos plastifikuojančios cheminės įmaišos dėl jų ekonominių ir techninių privalumų (Alsa-dey, 2015; Reddy *et al.*, 2015; Jiao *et al.*, 2017). Plastifikuojančios įmaišos mažina cementinių mišinių ribinius šlyties įtempius ir plastinę klampą dėl įmaišų elektrostatinio ir (arba) erdvinio cemento dalelių atstūmimo efekto (Qian *et al.*, 2018). Plastifikuojančios įmaišos efektyvumas cementinėje sistemoje priklauso nuo įmaišos molekulių adsorbcijos ant cemento dalelių ir veikiančių stūmos jėgų, kurias lemia adsorbuotos molekulės (Qian *et al.*, 2018). Jiao *et al.* (2017) nustatė, kad naujos kartos superplastiklių mechanizmas pagrįstas labiau erdvinio nei elektrostatinio cemento dalelių atstūmimo efektu. Perrot *et al.* (2012) nustatė, kad, padidinus superplastiklio kiekį cemento tešloje, vidutinis atstumas tarp dalelių paviršių padidėja ir koloidinė sąveika tarp cemento dalelių sumažėja. Tai lemia cemento tešlos ribinių šlyties įtempių ir plastinės klampos sumažėjimą. Kiti mokslininkai nustatė, kad įvedus didesnę superplastiklio kiekį į cemento tešlą, cemento dalelių didesnė paviršiaus dalis padengiama polimerais – tai lemia traukos jėgų tarp dalelių sumažėjimą ir atstumo tarp dalelių padidėjimą. Taip pat sumažėja ryšių skaičius, kuris reikalingas, kad susidarytų cemento hidratacijos produktų užuomazgos (Jiao *et al.*, 2017; Qian *et al.*, 2018).

Boukendađđji *et al.* (2012), Jiao *et al.* (2017) ir Mardani-Aghabaglou *et al.* (2013) nustatė, kad superplastiklių plastifikavimo efektas priklauso nuo jų tipo ir struktūros charakteristikų. Boukendađđji *et al.* (2012), ištyrę skirtingo tipo superplastiklių įtaką SSB mišinių reologinėms savybėms, nustatė, kad betono mišiniai su superplastikliu polikarboksilato esterių pagrindu pasižymi didesniais ribiniais šlyties įtempiais ir mažesne plastine klampa, palyginti su betono mišiniais, plastifikuotais superplastikliu naftaleno sulfonato pagrindu, kai šlako kiekis mišiniuose vienodas (Boukendađđji *et al.*, 2012). Papo ir Piani (2004) nustatė, kad cemento tešlą su superplastikliu, modifikuotą poliakrilinių polimerų pagrindu, ribiniai šlyties įtempiai ir plastinė klampa žymiai mažesnė, palyginti su tešlomis, plastifikuotomis superplastikliu modifikuotų lignosulfonatų, poliakrilatų ar melamino dervų pagrindu. Jiao *et al.* (2017) nustatė, kad superplastiklis naftaleno pagrindu efektyviai disperguoja cemento daleles ir pasižymi nedideliu oro įtraukimu į cementinius mišinius bei pailgina mišinių apdirbamumą. Boukendađđji *et al.* (2012) nustatė, kad superplastiklio polikarboksilatų pagrindu molekulinę struktūrą sudaro pagrindinė polietileno grandinė su šoninėmis polietileno oksido ir karboksilinėmis grandinėlėmis. Šio tipo superplastikliai pasižymi taip pat efektyviu cemento dalelių dispergavimu, cementinių mišinių apdirbamumo pailginimu, tačiau mažina mišinių rišimosi trukmę (nuo mišinių maišymo pradžios) (Boukendađđji *et al.*, 2012). Mardani-Aghabaglou *et al.*



(2013) nustatė, kad vienodo tipo plastifikuojančių įmaišų, kai pagrindinė polimero grandinė ir molekulinė struktūra vienoda, tačiau molekulinė masė ir šoninių grandinėlių (sudarytų iš karboksilinių rūgščių grupių), prijungtų prie pagrindinės polimero grandinės, išsidėstymo tankis skirtingas, įtaka betono mišinių reologinėms savybėms skiriasi. Mardani-Aghabaglou *et al.* (2013) ištyrė, kad SSB mišinių ribiniai šlyties įtempiai priklauso nuo superplastiklio kiekio. Tačiau didinant superplastiklio molekulinę masę ir šoninių grandinėlių, sudarytų iš karboksilinių rūgščių grupių, išsidėstymo tankį (ant pagrindinės superplastiklio polimero grandinės), mišinių plastinė klampa didėja dėl didėjančio superplastiklio dispersgavimo – erdvinio atstūmimo efekto (Mardani-Aghabaglou *et al.*, 2013).

Žinoma, kad orą įtraukianti įmaiša (AEA) skatina mažų oro burbulų susidarymą ir yra naudojama padidinti cementinio akmens atsparumą šalčiui. Pažymėtina, kad AEA gaminama paviršių aktyvinančių medžiagų (PAM) pagrindu, todėl ji padidina ir cementinių mišinių klijumą, kai kitos mišinio sudedamosios dalys pastovios, arba sumažina vandens poreikį, reikalingą tos pačios konsistencijos mišiniui paruošti. Be to, AEA keičia cementinių mišinių reologinę elgseną ir jos charakteristikas (Zhang *et al.*, 2019).

Mokslininkai atliko daug tyrimų siekdami ištirti AEA įtaką cementinių mišinių reologinėms savybėms: He *et al.* (2011) nustatė, kad didinant AEA kiekį skiedinių konsistencija didėja, Yun *et al.* (2015) – kad AEA sumažina didelio stiprumo smulkiagrūdžių betono mišinių klampumą ir pagerina pumpuojamumą aukšto slėgio siurbliais. Nustatyta, kad, didinant įtraukto oro kiekį mišinyje iki 5 %, betono mišinio tekamumas gerėja – plastinė klampa laipsniškai mažėja, ir tai, anot Jiao *et al.* (2017), susiję su mišinio tešlos kietųjų dalelių sutepimo efektu, kurio metu, veikiant mišinį šlytimi, deformuojasi įtraukto oro burbulai. Zhang *et al.* (2019) nuomone, padidinus įtraukto oro kiekį betono mišinyje padidėja atstumai tarp cemento dalelių ir sumažėja tarp jų trintis. Carlswärd *et al.* (2003) nustatė, kad veikiant betono mišinį šlytimi, AEA mažina mišinio plastinę klampą, tačiau mišinio ribiniams šlyties įtempiams didelės įtakos neturi. Nors Struble *et al.* (2004) nustatė priešingą efektą betono mišinio ribiniams šlyties įtempiams. Mokslininkai ištyrė, kad, didėjant įtraukto oro kiekiui mišinyje, betono mišinio (esant ramybės būsenos) ribiniai šlyties įtempiai didėja. Tokį patį efektą nustatė ir Zhang *et al.* (2019), kurių nuomone, tai lemia padidėjęs tešloje susidarančių ryšių skaičius tarp cemento dalelių ir oro burbulų. Mokslininkai pastebi, kad, viena vertus, kai cementinis mišinys yra ramybės būsenos, įtraukto oro burbulai elgiasi kaip mažo tūrio smulkios dalelės (10–100 μm), kurios padidina mišinio ribinius šlyties įtempius, kita vertus, veikiant mišinį šlytimi – kaip „skystis“ (dėl burbulų deformavimosi), kuris sumažina mišinio plastinę klampą (Zhang *et al.*, 2019). Be to, Ducloué *et al.* (2015) teigia, kad cementinių mišinių reologinė elgsena priklauso nuo šlyties greičio, kadangi paviršiaus įtempiai gali riboti įtraukto oro burbulų deformavimąsi, esant mažiems šlyties greičiams.

Žinoma, kad rišimosi lėtiklis – betono cheminė įmaiša, kuri didina cementinio mišinio rišimosi pradžios ir (arba) pabaigos trukmę nuo mišinio maišymo pradžios. Betono rišimosi lėtikliai pagal savo funkcijas skiriami į (Aičin, 2016a): 1) rišimosi lėtiklius (lignosulfoninių rūgščių druskos, karboksilinių rūgščių druskos), kurie ne tik lėtina cementinio mišinio rišimąsi, tačiau pasižymi ir cemento dalelių dispergavimo efektu (mišinių plastifikavimo efektu); 2) rišimosi lėtiklius (cukrus ir išvestiniai jo produktai bei tam tikros neorganinės druskos –  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7$ ,  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ,  $\text{SnSO}_4$ ,  $\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NaO}_7$ ,  $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$ ,  $\text{CaP}_2\text{O}_3$ ), kurie tik lėtina cementinio mišinio rišimąsi.

Plačiausiai betono pramonėje naudojamų betono rišimosi lėtiklių, kurie ne tik lėtina cementinio mišinio rišimąsi, tačiau pasižymi ir cemento dalelių dispergavimo efektu, įtaka cementinio mišinio reologinėms savybėms priklauso ne tik nuo jų cheminės prigimties, molekulinės struktūros, kiekio ir įvedimo į mišinį praėjusios laiko trukmės (nuo mišinio maišymo pradžios), bet ir nuo cemento charakteristikų (mineralinės sudėties, smulkumo, sulfatų kiekio) (Tan *et al.*, 2017; Ma *et al.*, 2015; Zajac *et al.*, 2016; Guo *et al.*, 2019). Ma *et al.* (2015) ir Tan *et al.* (2017) ištyrė rišimosi lėtiklio natrio gliukonato pagrindu (SG) įtaką cemento tešlų reologinėms savybėms. Nustatyta, kad SG pasižymi ne tik cemento tešlos rišimosi lėtinimu, bet ir cemento dalelių dispergavimo efektu. Pažymėtina, kad betono rišimosi lėtiklių dispergavimo efektas gali būti grindžiamas elektrostatiiniu cemento dalelių atstūmimu ir (arba) papildomu erdvinio atstūmimo efektu (Li *et al.*, 2012; Tan *et al.*, 2016). Didinant SG kiekį, cemento tešlos ribiniai šlyties įtempiai ir plastinė klampa mažėja (Ma *et al.*, 2015; Tan *et al.*, 2017). Tan *et al.* (2017) teigia, kad SG molekulinę struktūrą sudaranti pagrindinė grandinė su hidroksigrupėmis (OH) adsorbuojasi vertikalčiai ir (arba) horizontalčiai ant cemento dalelių paviršiaus. Prie pagrindinės grandinės prijungtos hidroksigrupės prisijungia vandens molekulės cementinės sistemos skystojoje fazėje, kurios suformuoja vandens plėvelę apie cemento daleles. Kong *et al.* (2015, 2016) nustatė, kad tai lemia tolesnio vandens patekimo prie cemento mineralų stabdymą ir cemento hidratacijos reakcijų lėtinimą. Tan *et al.* (2017) nustatė, kad ilgėjant laiko trukmei nuo tešlos maišymo pradžios cemento tešlos su SG (rišimosi lėtikliu) reologinės savybės nežymiai kinta. Mokslininkų nuomone, tai lemia ilgesnis pastovaus laisvojo vandens kiekio išlaikymas tešloje dėl sulėtėjusių cemento hidratacijos reakcijų.

Žinoma, kad rišimosi greitiklis – betono cheminė įmaiša, kuri mažina cementinio mišinio rišimosi pradžios ir (arba) pabaigos trukmę nuo mišinio maišymo pradžios. Justnes ir Petersen (2002) nustatė, kad plačiai naudojami rišimosi greitikliai  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  pagrindu neturi didelės įtakos cementinių tešlų reologinei elgsenai ir jos charakteristikoms. Skripkiūnas *et al.* (2016) nustatė, kad ilgėjant cemento hidratacijos reakcijų trukmei, cementinių mišinių reologinės savybės kinta – didėja ribiniai šlyties įtempiai ir plastinė klampa dėl vykstančių negrįž-

tamų pokyčių tešlos mikrostruktūroje. Be to, šie mokslininkai nustatė, kad rišimosi greitiklis  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  pagrindu (CN) (iki 2 % nuo cemento masės) neturi didelės įtakos cementinių mišinių – cemento tešlų ir betono mišinių reologinėms savybėms iki 120 min nuo mišinių maišymo pradžios. Kai CN kiekis yra nuo 2 iki 3 %, cementinių mišinių ribiniai šlyties įtempiai nekinta iki 120 min, o plastinė klampa iki 60 min. Toliau didinant CN kiekį nuo 3 % ir daugiau, mišinių ribiniai šlyties įtempiai ir plastinė klampa intensyviai didėja iškart nuo jų maišymo pradžios. Mokslininkų nuomone, didesnis CN kiekis labiau pagreitina cemento  $\text{C}_3\text{S}$  hidratacijos reakciją nei mažesnis – tai lemia intensyvesnę struktūros stiprumo didėjimą. Šio tyrimo metu nustatyta, kad CN neturi didelės įtakos mišinių su portlandcemenčiu CEM I 42,5 R ar sudėtinio klinties portlandcemenčiu CEM II/A-LL 42,5 R tiksotropiškumui iki 120 min nuo mišinių maišymo pradžios, tačiau mišiniams su sudėtinio klinties portlandcemenčiu CEM II/A-LL 42,5 N turi – didinant CN kiekį nuo 1 iki 5 %, mišinių tiksotropiškumas didėja. Pažymėtina, kad ilgėjant laiko trukmei nuo mišinių maišymo pradžios, mišinių su CN (iki 3 % kiekio) tekamumas sumažėja labiau nei mišinių be CN. Tačiau paveikus mišinius tam tikru šlyties greičiu mišinių struktūra suardoma ir jų tekamumui CN didelės įtakos neturi (Skripiūnas *et al.*, 2016). Atlikus literatūros apžvalgą galima teigti, kad trūksta duomenų apie rišimosi greitiklių įtaką betono mišinių reologinei elgsenai bei jos charakteristikoms.

Klampą modifikuojančios įmaišos (VMA) priskiriamos prie santykinai naujų betono cheminių įmaišų, kurios pradėtos plačiai naudoti cementiniuose mišiniuose dėl jų teigiamos įtakos mišinių reologinei elgsenai ir homogeniškumui bei koheziškumui (Jiao *et al.*, 2017). VMA veikimo mechanizmas priklauso nuo jos tipo ir veikliosios medžiagos koncentracijos mišinyje. Eksopolisacharidų ir įvairių celiuliozės išvestinių produktų veikimo mechanizmas pagrįstas adsorbcijos, surišimo ir persipynimo efektais (Jiao *et al.*, 2017). Brumaud *et al.* (2014) nustatė, kad adsorbuotas celiuliozės eteris ant cemento dalelių tešloje sulėtina kalcio silikatų reakcijas, tarp cemento dalelių sukuria erdvines stūmos jėgas, kurios pakeičia vyraujančias Van der Valso traukos jėgas, ir suformuoja naują ryšių (sąveikos) tinklą, kuris tarpusavyje apjungia cemento daleles. Jiao *et al.* (2017) teigia, kad neorganinės VMA, pasižyminčios dideliu paviršiaus plotu, padidina tešloje smulkiųjų dalelių turinį kiekį, tai lemia cemento tešlos tiksotropiškumo padidėjimą.

VMA didina betono mišinio ribinius šlyties įtempius ir plastinę klampą bei tiksotropiškumą (Assaad *et al.*, 2003). Schmidt *et al.* (2010) nustatė, kad VMA įtaka betono mišinių ribiniams šlyties įtempiams yra žymiai didesnė, palyginti su superplastiklio polikarboksilato esterių pagrindu. Kai VMA yra modifikuotų bulvių krakmolo pagrindu, plastifikuoti mišiniai (nepriklausomai nuo plastifikuojančios įmaišos tipo) pasižymi geresniu homogeniškumu, atsparumu sluoksniavimuisi ir mažesniu vandens atsiskyrimu iš mišinio (esant ramybės būsenos),

palyginti su mišiniais, kuriuose naudoti didelės molekulinės masės polisacharidai (angl. „Diutan Gum“). Yun *et al.* (2015) nustatė, kad VMA hidroksipropilo metilo celiuliozės pagrindu padidina didelio stiprumo betono mišinio klampą ir blogina mišinio pumpuojamumą aukšto slėgio siurbliais, o Leemann ir Winnefeld (2007) – kad VMA polisacharidų pagrindu labiau padidina betono mišinių ribinius šlyties įtempius, nei naudojant VMA pakaitą –  $\text{SiO}_2$  mikrodulkes. Pažymėtina, kad mišinių su skirtingo tipo VMA plastinė klampa išlaikyta pastovi. Brumaud *et al.* (2014) nustatė, kad didinant VMA kiekį nuo 0 iki 2 % nuo cemento masės, cemento tešlos kritinė deformacija (santykinis poslinkis tarp tešlos dalelių, veikiant tešlą šlytimi) didėja. Mokslininkų nuomone, tai lemia didėjantis ryšių, jungiančių tarpusavyje cemento daleles, skaičius. Bauras *et al.* (2012) nustatė, kad cementinių mišinių (tešlų, skiedinių) su VMA reologinė elgsena priklauso nuo mišinius veikiančio šlyties greičio. Kai šlyties greičiai maži, mišiniai pasižymi pseudoplastišku tekėjimu. Tačiau mišinius veikiant santykinai dideliais šlyties greičiais, mišiniai pasižymi dilatantišku tekėjimu. Mokslininkų nuomone, kai šlyties greičiai maži, mišinio cemento tešloje kietųjų dalelių flokuliacija sumažėja ir persipynusios tarp cemento dalelių VMA polimerų grandinės persiskirsto bei išsidėsto mišinio tekėjimo kryptimi.

1982 m. Goto *et al.* (1982) išrado traukumą mažinančią įmaišą (SRA), kuri sudaryta iš organinių cheminių medžiagų, žinomų kaip PAM, arba surfaktantai. Įprastai SRA būna sudarytas iš įvairių komponentų: monohidroksilių alkoholių, glikolių, polioksialkileno glikolio alkileterių ir polimerinių surfaktantų. Tačiau pastaruoju metu atliekama daugybė tyrimų, kuriuose taikomi įvairūs SRA modifikavimo būdai, siekiant efektyviau sumažinti betono traukumą (Zhan ir He, 2019). Sugiyama *et al.* (1998) sukūrė cementinių mišinių SRA, kuri pasižymi ir vandens poreikio mišinyje mažinimu, prijungus papildomas eterio funkcines grupes prie superplastiklio polikarboksilato druskų pagrindu pagrindinės molekulinės grandinės (struktūros). Rongbing ir Jian (2005) etoksiliacijos cheminio proceso būdu susintetino SRA naudodami 2-butoksietanolį ir etileno ar propileno oksidą. Nakanishi *et al.* (2003) laisvųjų radikalų polimerizacijos reakcijos būdu, tarp monomero, 2-etilheksilmetakrilato (ar butilmetakrilato, ar laurilmetakrilato, ar metakrilinės rūgšties) ir metakrilinės rūgšties–etileno glikolio monometileterio esterio, esant skirtingoms molekulinėms masėms, sukūrė cementinio mišinio traukumą mažinančią SRA. Kinoshita *et al.* (2007) sukūrė ir patentavo daugiafunkčę cheminę įmaišą alilo alkoholio eterio-maleino anhidrito kopolimero pagrindu, pasižyminčia efektyviu vandens poreikio mišinyje ir cementinio mišinio traukumo mažinimu.

Apibendrinus apžvelgtus tyrimus galima teigti, kad siekiant sumažinti cementinių mišinių traukumą, mokslininkai vis didesnę dėmesį skiria daugiafunkcėms cheminėms įmaišoms, kurios pasižymi kompleksiniu poveikiu – plastifikoja, mažina vandens poreikį mišinyje ir traukumo deformacijas. Tačiau

dauguma tyrimų, siekiant ištirti SRA įtaką cementinių mišinių reologinei elgsenai, atlikti atsižvelgus tik į bendrą (kompleksinį) SRA ir plastifikuojančios ar kitų cheminių įmaišų mišiniuose įtaką. Corinaldesi (2012) nustatė, kad SRA polietileno glikolio pagrindu, esant mišiniuose superplastikliui karboksilinio akrilinio esterio pagrindu, mažina cementinių mišinių – cemento tešlų ir SSB mišinių ribinius šlyties įtempius ir plastinę klampą bei tiksotropiškumą. Tačiau duomenų apie SRA įtaką betono mišinių reologinėms savybėms ir tiksotropiškumui nebuvo rasta.

### 1.3.6. Mineralinių priedų įtaka cementinių mišinių reologinėms charakteristikoms

Pastaruoju metu vis plačiau betone naudojami cementai, kurių portlandcemenčio klinkerio dalis pakeista skirtingo tipo mineraliniais priedais (lakiaisiais pelenais, granuliuotu aukštakrosnių šlaku,  $\text{SiO}_2$  mikrodulkėmis) siekiant pagerinti norimas betono savybes (Rutkauskas, 2018).

Laskar ir Talukdar (2008) ištyrė lakiųjų pelenų (FA) įtaką betono mišinio reologinėms savybėms. Nustatyta, kai FA kiekiai mišinyje maži, kontrolinio betono mišinio ribiniai šlyties įtempiai sumažėja, tačiau esant didesniems FA kiekiams mišinyje – nežymiai padidėja. Beycioğlu ir Aruntaş (2014) nustatė, kad FA pagerina SSB mišinio tekamumą ir pratekamumą bei sumažina jo plastinę klampą – tai lemia sumažėjęs vandens poreikis mišinyje panaudojus pelenus, kurių dalelės pasižymi sferine forma ir lygiu paviršiumi. Tačiau Rahman *et al.* (2014) nustatė, kad FA padidina mišinio tešlos flokuliaciją, o kartu ir padidėjusią SSB mišinio plastinę klampą.

Ahari *et al.* (2015b) ištyrė lakiųjų pelenų įtaką betono mišinio reologinėms savybėms. Tirti skirtingo tipo FA: su netaisyklingos formos ir akyto paviršiaus dalelėmis (FAC) ir su sferinės formos ir lygaus paviršiaus dalelėmis (FAF). Nustatyta, kad betono mišinių su FAF plastinė klampa daugiau sumažėja nei mišinių su FAC. Mokslininkų nuomone, FA smulkumas ar dalelių pasiskirstymas pagal dydį taip pat lemia reologinių savybių kitimą: kai mišinyje yra FA, kurių vidutinis dalelių dydis ne didesnis kaip  $3\ \mu\text{m}$ , kontrolinio cementinio mišinio pasklida sumažėja, o didinant pelenų vidutinį dalelių dydį nuo  $3\ \mu\text{m}$  ir daugiau – mišinio pasklida laipsniškai didėja (Li ir Wu, 2005).

Žinoma, kad lakiųjų pelenų tankis ( $2000\text{--}2200\ \text{kg/m}^3$ ) yra mažesnis, palyginti su portlandcemenčio ( $3000\text{--}3200\ \text{kg/m}^3$ ). Keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį FA (pagal masę), cementiniame mišinyje padidėja tešlos kiekis, tai lemia cemento dalelių koncentracijos ir jų flokuliacijos tešloje sumažėjimą (Bentz *et al.*, 2012). Be to, sferinės formos ir lygaus paviršiaus FA dalelės sumažina trintį tarp kampuotų cemento dalelių. Dėl FA stambesnio dalelių pasiskirstymo, palyginti su cemento, tarp cemento dalelių padidėja atstumai (Vance

*et al.*, 2013). Jiao *et al.* (2017) teigia, kad FA taip pat gali lėtinti cemento hidracijos pradžią ir pailginti cementinio mišinio rišimąsi, ir kartu lemia cementinio mišinio ribinių šlyties įtempių ir plastinės klampos sumažėjimą.

Jiao *et al.* (2017) teigia, kad vis dažniau naudojamas cementiniuose mišiniuose (tešlose, skiediniuose, betono mišiniuose) cementas, kurio dalis pakeista granuliuotu aukštakrosnių šlaku (GGBFS), kadangi šis mineralinis priedas ne tik pagerina mišinių klijumą, bet ir sumažina į aplinką išskiriamo CO<sub>2</sub> kiekį. Remiantis literatūros apžvalga, GGBFS paprastai mažina cementinių mišinių plastinę klampą (Derabla ir Benmalek, 2014; Boukendakdji *et al.*, 2012; Park *et al.*, 2005; Ezziane *et al.*, 2014; Ahari *et al.*, 2015b), tačiau Cao *et al.* (2012) nustatė priešingą efektą. Tang *et al.* (2014) ištyrė cemento tešlų, plastifikuotų skirtingu superplastiklio kiekiu ir modifikuotų įvedus didelį GGBFS kiekį, reologines savybes, esant skirtingai tešlų konsistencijai. Nustatyta, kad tešlų su GGBFS plastinė klampa yra didesnė, o jų stabilumas ir tekėjimo greitis mažesnis, palyginti su tešlomis be GGBFS, tačiau vienodos konsistencijos. Tačiau mokslininkai vieningai sutaria, kad iki šiol nėra aiški GGBFS įtaka mišinių ribiniams šlyties įtempiams (Jiao *et al.*, 2017). Park *et al.* (2005) nustatė, kad esant mažiems cemento pakaitos – GGBFS – kiekiams, betono mišinių ribiniai šlyties įtempiai ir plastinė klampa sumažėja. Toliau didinant GGBFS kiekius, mišinių ribiniai šlyties įtempiai didėja, tačiau plastinė klampa mažėja. Ahari *et al.* (2015b) nustatė, kad pakeitus portlandcemenčio klinkerio dalį 18 % GGBFS, betono mišinių, kurių V/K – 0,44, ribiniai šlyties įtempiai ir plastinė klampa bei tiksotropiškumas mažėja.

Jiao *et al.* (2017) teigia, kad granuliuoto aukštakrosnių šlako didelis savitasis paviršius (350–550 m<sup>2</sup>/kg) ir cheminis aktyvumas yra pagrindiniai veiksniai, turintys teigiamos arba neigiamos įtakos cementinių mišinių (tešlų, skiedinių ir betono mišinių) reologinėms savybėms. Mokslininkų nuomone, viena vertus, GGBFS pagerina cemento dalelių granulimetriją, todėl padidėja sukibimas tarp tešlos dalelių. Be to, GGBFS pasižymi didesniu smulkumu, palyginti su cemento, todėl esant superplastikliui cementiniame mišinyje, GGBFS dalelės adsorbuoja didesnį plastifikuojančios įmaišos kiekį. Tai lemia trinties tarp tešlos dalelių sumažėjimą. Kita vertus, GGBFS didelis savitasis paviršius ir cheminis aktyvumas padidina cementinių mišinių vandens poreikį, o tai turi neigiamos įtakos cementinių mišinių reologinėms savybėms.

Atlikus literatūros apžvalgą galima pastebėti, kad SiO<sub>2</sub> mikrodulkės (SF) dažniausiai padidina cementinių mišinių (tešlų, skiedinių ir betono mišinių) ribinius šlyties įtempius bei plastinę klampą (Benaicha *et al.*, 2015; Park *et al.*, 2005; Rahman *et al.*, 2014; Lu *et al.*, 2015). Taip pat sumažina mišinių tekamumą. Benaicha *et al.* (2015) ir Nanthagopalan *et al.* (2008) nustatė, kad SF, kurias sudaro 85–96 % SiO<sub>2</sub>, su labai smulkiomis amorfinėmis dalelėmis pasižymi didesniu cheminiu aktyvumu, palyginti su lakiųjų pelenų. Dėl didesnio smulkumo

ir cheminio aktyvumo SF padidina vandens poreikį cementiniuose mišiniuose ir vidinę trintį tarp cemento dalelių. Ahari *et al.* (2015b) nustatė, kad SF tešloje padidina cemento dalelių flokuliacijos greitį, lemiantį cementinių mišinių homogeniškumą ir koheziškumą. Tačiau kiti mokslininkai nurodo priešingą SF įtaką cementinių mišinių reologinėms savybėms: Zhang ir Han (2000) teigia, kad SF mažina cemento tešlos ribinius šlyties įtempius ir plastinę klampą, Ahari *et al.* (2015b) – kad SF didina SSB mišinių ribinius šlyties įtempius ir tiksotropiškumą, tačiau mažina jų plastinę klampą. Išanalizavus literatūrą galima pastebėti, kad, esant skirtingo tipo superplastikliams mišinyje ir mišinių V/C (ar V/K) santykiui, SF įtaka cementinių mišinių reologinėms savybėms skiriasi. Laskar ir Talukdar (2008) nustatė, kad SF padidina betono mišinio, plastifikuoto superplastikliu polikarboksilato esterių pagrindu, ribinius šlyties įtempius, tačiau betono mišinio, plastifikuoto superplastikliu naftalino sulfonatų pagrindu, sumažina. Nanthagopalan *et al.* (2008) ištyrė V/K santykio (pagal tūrį) ir cemento pakaitos ( $\text{SiO}_2$  mikrodulkių) kiekio įtaką cementinių suspensijų reologinėms savybėms. Nustatyta, kad pakeitus portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 0 iki 25 % SF, cementinių suspensijų (V/K – 1,50) santykiniai ribiniai šlyties įtempiai ir santykinė plastinė klampa padidėja atitinkamai iki 0,15 ir 0,17. Be to, sumažinus suspensijų V/K nuo 1,86 iki 1,22 ir pakeitus portlandcemenčio klinkerio dalį 12 % SF, cementinių suspensijų santykiniai ribiniai šlyties įtempiai ir santykinė plastinė klampa padidėja atitinkamai nuo 0,04 iki 0,32 ir nuo 0,06 iki 0,23.

## 1.4. Cementinių mišinių džiūstamasis traukumas ir jį lemiantys veiksniai

Džiūstamasis traukumas pasireiškia išgaruojant ar kitaip pasišalinant vandeniui iš kietėjančio cementinio mišinio aplinkoje, kurios drėgnis mažesnis už mišinio higroskopinį drėgnį (Rezvani *et al.*, 2019). Kaip žinoma, dėl vandens garavimo nuo mišinio paviršiaus šviežio mišinio (iki rišimosi pabaigos) traukumas, vadinamas plastiškuoju, pasireiškia, tačiau yra nedidelis. Kaip džiūstamasis, taip ir savaiminis traukumas pasireiškia po šviežio mišinio susirišimo. Pastarasis pasireiškia dėl vandens jungimosi vykstant cheminėms bei fizikinėms reakcijoms. Vadinasi, bendrą kietėjančio betono traukumą sudaro dvi pagrindinės traukumo dalys – savaiminis ir džiūstamasis. Pažymėtina, kad normaliojo betono savaiminis traukumas yra nežymus ( $<100 \cdot 10^{-6}$ ), todėl traukumas vertinamas pagal džiūstamojo traukumo deformacijas. Kita vertus, vertinant didelio ir ypač didelio stiprumo betono, pagaminto su mažu V/C santykiu ( $\text{V/C} < 0,42$ ), traukumą, savaiminio traukumo deformacijos turi būti įvertintos, nes jos gali būti didesnės už džiūstamojo traukumo deformacijas (Wu *et al.*, 2017).

Betono pleišėjimas – iki šiol aktuali problema, kai didėjant cementinio akmens traukumo deformacijoms vidiniai įtempiai betone taip pat didėja, kuriems viršijus betono ribinį tempiamąjį stiprį, atsiranda plyšiai (Maruyama ir Sugie, 2014). Įprastai betono plastinio ir savaiminio traukumo deformacijos yra nedidelės, palyginti su džiūstamojo traukumo. Tačiau dėl jau paminėtų atvejų gali būti ir priešingai. Esant tiek mažoms, tiek didelėms traukumo deformacijoms, betone atsiradę plyšiai dėl plastinio ir savaiminio traukumo gali dar labiau vystytis kartu su džiūstamojo traukumo deformacijomis, kurios ilgėjant betono kietėjimo trukmei didėja. Tai, anot Mazzoli *et al.* (2015), sukelia neigiamus konstrukcijų išvaizdos pokyčius bei turi neigiamą poveikį jų vientisumui, tinkamumui ir patvarumui.

Traukumas yra fenomenalus reiškinys, kai kietėjant traukiasi betono cementinė tesla, o betono užpildai yra gniuždomi, vyksta teslos traukumo deformacijų suvaržymas. Betono traukumo deformacijos priklauso nuo daugelio technologinių ir struktūrinių veiksnių. Svarbiausieji iš jų: cemento rūšis, cheminė ir mineralinė sudėtis bei grūdelių smulkumas; cemento kiekis ir V/C santykis; įvairios betono cheminės įmaišos ir mineraliniai betono priedai, turintys poveikį hidratacijos mechanizmui ir kinetikai ar betono struktūros formavimuisi; cemento hidratacijos laipsnis; užpildų rūšis ir jų granulimetrinė sudėtis; užpildų mechaninės savybės; kietėjimo sąlygos; betoninio elemento paviršiaus ploto su tūriu santykis ir storis.

#### **1.4.1. Cementinių mišinių struktūros poveikis džiūstamajam traukumui**

Brooks (1989), Marčiukaitis (2013) ištyrė cemento kiekio nuo 250 iki 750 kg/m<sup>3</sup>, kai V/C = 0,6, bei bendrą – V/C (intervalo ribose nuo 0,2 iki 0,6) ir cemento kiekio poveikį cemento akmens traukumo deformacijoms, kai vandens kiekis pastovus (150 kg/m<sup>3</sup>). Nustatyta, kad cementinio akmens traukumas yra tiesiogiai proporcingas cemento kiekiui, išlaikant pastovų V/C santykį (V/C = 0,6), ir atvirkščiai proporcingas V/C, kai vandens kiekis pastovus (150 kg/m<sup>3</sup>). Pažymėtina, kad jei V/C santykis didesnis nei 0,6, kai išlaikomas pastovus cemento kiekis mišinyje (250 kg/m<sup>3</sup>), papildomas vandens kiekis iš hidratuojančio cemento akmens pasišalina garuodamas ir neturi didelės įtakos akmens traukumui.

Remiantis Lea (1970) pateiktomis tipinėmis betono džiūstamojo traukumo deformacijų reikšmėmis (1.1 lentelė), galima teigti, kad cementiniame mišinyje esantys užpildai suvaržo cementinio akmens traukumą. Pažymėtina, kad traukumo deformacijų reikšmės pateiktos neatsižvelgiant į kitus veiksnus, kurie gali turėti poveikį galutinėms mišinio traukumo deformacijoms. Traukumo bandymas atliktas kontroliuojamoje aplinkoje (oro temperatūra 21 °C, o santykinė oro



drėgmė 50 %). Nustatyta, kad padidinant užpildo ir cemento kiekio santykį ir (arba) sumažinant V/C santykį cementinio mišinio džiūstamojo traukumo deformacijos po 180 parų (nuo mišinio maišymo pradžios praėjus 1 kietėjimo parai) sumažėja. Tokius pat rezultatus gavo Maruyama ir Sugie (2014). Hajibabae ir Ley (2015, 2016) teigia, kad tipinės cemento tešlų džiūstamojo traukumo deformacijų reikšmės yra didesnės 1,7 karto, palyginti su skiedinių, ir nuo 6 iki 8 kartų, palyginti su betonu.

**1.1 lentelė.** Tipinės betono džiūstamojo traukumo deformacijų reikšmės (Lea, 1970)

**Table 1.1.** Typical values of drying shrinkage deformation of concrete (Lea, 1970)

Užpildo ir cemento kiekio santykis	Džiūstamojo traukumo deformacijos ( $\cdot 10^{-6}$ ) po 180 kietėjimo parų			
	V/C			
	0,4	0,5	0,6	0,7
3	800	1200	–	–
4	550	850	1050	–
5	400	600	750	850
6	300	400	550	650
7	200	300	400	500

Santykis tarp betono ir cementinio akmens santykinių traukumo deformacijų ( $\varepsilon_{cs}/\varepsilon_{cem,s}$ ) priklauso nuo užpildų kiekio betone. Žinant cementinio akmens traukumo deformaciją ir užpildų santykinį tūrį ( $V_{agr.}$ ), betono traukumo deformacijos apskaičiuojamos pagal A. M. Neville (1.12) formulę (Marčiukaitis, 2013; Hajibabae ir Ley, 2016):

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cem,s}(1 - V_{agr.})^n, \quad (1.12)$$

čia  $\varepsilon_{cs}$  ir  $\varepsilon_{cem,s}$  – betono ir cemento akmens santykinės traukumo deformacijos;  $V_{agr.}$  – užpildų santykinis tūris;  $n$  – koeficientas, įvertinantis tokius gamybos technologinius veiksnius, kaip tankumas, kietėjimo sąlygos ir kt.

Marčiukaitis (2013) remdamasis Pickett (1956) bei L'Hermite (1960) tyrimų rezultatais teigia, kad koeficientas  $n$  priklauso nuo cemento akmenyje pasireiškiančio valkšnumo dydžio. Šio koeficiento reikšmės kitimo intervalas yra nuo 1,2 iki 1,7 (Hajibabae ir Ley, 2016).

Hansen ir Almudaiheem (1987) nustatė, kad santykinė betono džiūstamojo traukumo deformacija gali būti tiksliau apskaičiuota žinant santykinę cementinio akmens traukumo deformaciją ir išlaikant pastovų cementinio mišinio V/C santykį bei hidratacijos laipsnį, taip pat įvertinant užpildų kiekį mišinyje ir jo tampumo modulį.

Powers (1959) ir Kurda *et al.* (2019) teigia, kad betono užpildo dalelių dydis bei granulimetrija *per se* neturi įtakos betono traukumo dydžiui, tačiau di-

desnės užpildų dalelės leidžia paruošti betono mišinį su mažesniu cementinės tešlos kiekiu. Tai lemia mažesnę betono traukumą. Pickett (1956) nustatė, kad padidinant betono užpildo didžiausios dalelės dydį ( $D_{max}$ ) nuo 6,3 iki 152 mm padidėja tūrinis užpildo kiekis nuo 60 iki 80 % viso tūrinio betono kiekio. Padidinus betono užpildų kiekį nuo 71 iki 74 % ir išlaikius pastovų V/C, betono traukumas sumažėja apie 20 %.

Shoya (1979), Piasta ir Zarzycki (2017) nustatė, kad išlaikant pastovų betono V/C santykį ir didinant cemento kiekį mišinyje, betono traukumas padidėja dėl didesnio hidratuoto cemento akmens tūrio betone. Tačiau nekeičiant betono mišinio klijumo, išlaikant pastovų vandens kiekį mišinyje bei didinant cemento kiekį, betono traukumas nežymiai sumažėja dėl mažesnio V/C santykio ir didesnio gebėjimo pasipriešinti cemento akmens traukumui.

Shacklock ir Keene (1957) nustatė, kad vandens kiekis *per se* nėra pirminis veiksnys, lemiantis betono traukumą. Kurda *et al.* (2019) ir Marčiukaitis (2013) teigia, kad vandens kiekio mišinyje poveikio dydis betono traukumui priklauso nuo to, kiek sumažėja arba padidėja užpildo, varžančio cemento akmens traukumą, tūrinis kiekis betone. Pažymėtina, kad esant pastoviam vandens kiekiui betono mišiniuose, tačiau skirtingai mišinių sudėčiai, santykinės betono traukumo deformacijų reikšmės skiriasi.

Reichard (1964), Marčiukaitis (2013) nustatė, kad nuo betono užpildų tamprumo modulio priklauso besitraukiančio cemento akmens betone suvaržymo laipsnis. Marčiukaitis (2013) teigia, kad kuo betono užpildai silpnesni ir poringesni, tuo lengviau jie suspaudžiami, cemento akmuo, kaip ir visas betonas, daugiau susitraukia. Troxell *et al.* (1958) ir Zhang *et al.* (2013) ištyrė, kad sunkieji betono užpildai iš žvirgždo, granito, kvarcito ar kalkakmenio pasižymi didele tamprumo modulių ir yra beveik nesuspaudžiami. Pažymėtina, kad labai didelę įtaką traukumui turi betono užpildų užterštumas priemaisomis (Marčiukaitis, 2013): betono, užteršto molio priemaisomis, traukumas padidėja iki 70 %, palyginus su betono be priemaisų (Powers, 1959; Marčiukaitis, 2013).

Swayze (1960) teigia, kad skirtingos cemento savybės turi nedidelį poveikį betono traukumui. Mokslininkas nustatė, kad didesnis cemento akmens traukumas nebūtinai lemia didesnę betono traukumą su atitinkamų savybių cementu. Pažymėtina, kad cemento smulkumas turi poveikį betono traukumui, kai jo dalelių dydis yra didesnis nei 75  $\mu\text{m}$ . Tokio dydžio dalelės hidratuoja santykinai mažai ir varžo cemento akmens traukumą panašiai kaip užpildas (Swayze, 1960; Marčiukaitis, 2013). Mokslininkai nustatė, kad smulkesnis cementas padidina cemento akmens betone traukumą (Neville, 1962), tačiau normaliojo ar lengvojo betono traukumo nedidina (Swayze, 1960; Bennett ir Loat, 1970; Swamy, 1974).

Pickett (1974), Marčiukaitis (2013) teigia, kad cemento cheminė sudėtis neturi didelio poveikio betono traukumui, išskyrus tą atvejį, kai cimente yra per mažas gipso kiekis: trūkstant cimente gipso, betono traukumas žymiai padidėja,

palyginti su betono, kurio cemento yra pakankamas gipso kiekis. Lea (1960) nuomone, padidėjusį traukumą lemia pakitusi cemento akmens struktūra; cemento rišimosi metu susiformavusios pradinės struktūros karkasas lemia besiformuojančio cemento akmens struktūrą, kartu ir cemento akmens gelio ir tuštumų santykį, stiprį bei valkšnumą. Pažymėtina, kad optimalus gipso kiekis normaliam cemento rišlumui gauti yra gerokai mažesnis, nei tas, kurio reikia traukumui sumažinti (Lerch, 1946).

Lea (1970) ištyrė cemento su padidintu  $Al_2O_3$  kiekiu poveikį betono traukumui ir nustatė, kad cemento padidintas  $Al_2O_3$  kiekis lemia didesnes betono traukumo deformacijas kietėjimo pradžioje. Tačiau ilgėjant kietėjimo trukmei, betono traukumo dydis yra panašus, palyginti su betono, kuriam pagaminti naudotas standartinės sudėties portlandcementis.

#### **1.4.2. Cementinių mišinių kietinimo sąlygų poveikis džiūstamajam traukumui**

Marčiukaitis (2013) teigia, kad kietėjančių cementinių mišinių (betono) traukumas vyksta ilgą laiką, tačiau didesnė jo dalis įvyksta per pirmąsias 60 ar 90 parų (nuo mišinių maišymo pradžios praėjus 1 kietėjimo parai). Toliau ilgėjant kietėjimo trukmei, traukumo intensyvumas mažėja. Mokslininko nuomone, ilgalaikio kietėjimo metu dalį betono traukumo sudaro traukumas dėl karbonizacijos. Tačiau didžiausią poveikį traukumui, kai visos kitos bei anksčiau paminėtos sąlygos vienodos, turi aplinkos temperatūra ir drėgmė (Yačinkaya ir Yazıcı, 2017).

Pailginus kietėjimo vandenyje trukmę, cementinio akmens traukumo pradžia pavėlinama. Tokio kietinimo efektas galutiniam traukumo dydžiui yra nedidelis (Hajibabae ir Ley, 2015), tačiau kompleksiškas, kadangi sumažėja nehidratavusių dalelių kiekis cementiniame akmenyje. Powers (1959) teigia, kad traukumas padidėja dėl cementinio akmens sumažėjusio suvaržymo, kurį lemia sumažėjęs nehidratavusių dalelių kiekis. Tačiau, ilgėjant kietėjimo vandenyje trukmei, hidratuojančioje cemento tesloje didėja cemento hidratacijos laipsnis ir mažėja vandens kiekis – tai lemia cemento akmens stiprumo bei atsparumo supleišėjimui dėl padidėjusio traukumo didėjimą.

Džiūvimo greitis betono traukumui didelio poveikio neturi, išskyrus atvejį, kai staigiai pakeičiamos betono kietėjimo sąlygos. Dėl šio veiksnio betono traukumas padidėja ir betone gali atsirasti plyšių. Be to, nei vėjas, nei priverstinė konvekcija neturi jokio poveikio vandens pasišalinimo greičiui iš betono, išskyrus atvejį, kai betonas yra šviežios būsenos. Nustatyta, kad betono drėgmės laidumas yra labai mažas, todėl gali pasireikšti tik nežymus garavimas iš betono, šis garavimas judant orui nedidėja (Pihlajavaara, 1963; Hansen, 1966).

Troxell *et al.* (1958) ištyrė santykinės aplinkos drėgmės poveikį kietėjančio betono traukumui. Nustatyta, kad betono, kietinto vandenyje 20 metų, santyki-

nės traukumo deformacijos mažesnės 6 ir 8 kartus, palyginus su betono, kietinto kontroliuojamoje aplinkoje (temperatūra 20 °C, o santykinė oro drėgmė atitinkamai 50 ir 70 %). Lorman (1940) nustatė, kad tik nesuvaržyto ir nedidelių matmenų hidratavusio cementinio mišinio, kurio higroskopinis 94 % drėgnis atitinka mišinio aplinkos kietėjimo drėgnį, traukumas yra nežymus dėl nusistovėjusios termodinaminės pusiausvyros tarp garavimo ir kondensacijos. Remiantis ACI 209R-92 (American Concrete Institute 209, 2008), parinkus santykinę oro drėgmę, betono traukumą galima apskaičiuoti iš priklausomybės tarp santykinės betono traukumo reikšmės ir santykinės oro drėgmės.

Kadangi džiūvimas vyksta nuo betoninio gaminio paviršiaus, todėl betono traukumo dydis priklauso nuo gaminio dydžio ir formos arba gaminio paviršiaus ploto su tūriu santykio (Ross, 1944; Dönmez ir Bažant, 2016; Hajibabae ir Ley, 2015). Ross (1944) nustatė, kad padidinus betono gaminio dydį nuo 75×75×300 mm iki 1000×1000×4000 mm, santykinė traukumo deformacijų reikšmė po 7 mėnesių, 3, 5 ir 8 metų (nuo mišinių maišymo pradžios praėjus 1 kietėjimo parai) sumažėja atitinkamai apie 90, 65, 55, 50 %. Tačiau Hobbs (1977), Hansen ir Almudaiheem (1987) bei Dönmez ir Bažant (2016) nuomone, betoninių elementų traukumas nepriklauso nuo jų dydžių, tačiau didesnių gaminių yra mažesnis. Hansen ir Mattock (1966) nustatė tiesinę priklausomybę tarp betoninio gaminio tūrio ir paviršiaus ploto santykio ( $V/S_c$ ) ir logaritminio gaminio traukumo. Padidinus  $V/S_c$  santykį nuo 10 iki 160 mm, didžiausia santykinė betono traukumo deformacija sumažėja apie 50 %.

### 1.4.3. Betono cheminių įmaišų poveikis cementinių mišinių džiūstamajam traukumui

Plastifikuojančių įmaišų poveikis. Ma *et al.* (2007) ištyrė superplastiklio poveikį cementinių skiedinių bendrajam traukumui. Traukumo deformacijos buvo matuotos 28 paras, nuo mišinių maišymo pradžios praėjus 1 kietėjimo parai. Tyrimo metu skiedinio bandinius (25×25×280 mm) kietinus kontroliuojamoje aplinkoje (oro temperatūra 20±3 °C, o santykinė oro drėgmė 55±4 %) nustatyta, kad didinant superplastiklio polikarboksilatų esterio pagrindu (PCE) kiekį nuo 0 iki 1,5 % nuo cemento masės ir išlaikant pastovų V/C santykį bei vandens kiekį mišinyje, skiedinio traukumas viso kietėjimo metu padidėja. Skiedinių traukumo deformacijų reikšmės, palyginti su kontrolinio skiedinio, po 28 kietėjimo parų skiriasi: esant PCE kiekiui 0,5 % – 80 %, 1,0 % – 95 % ir 1,5 % – 110 %. Viena vertus, Yang ir Wen (2002) nustatė, kad kietėjančių cementinių mišinių su superplastikliu džiūstamasis traukumas, palyginti su kontrolinių mišinių, padidėja dėl smulkesnių kapiliarinių porų susiformavimo (nuo 3,2 iki 25 nm skersmens) bei jų tūrinio kiekio padidėjimo cementiniame akmenyje. Kita vertus, Gedam *et al.* (2015), Sonebi *et al.* (2015) ir Zhu *et al.* (2017) teigia, kad superplastikliai

*per se* kietėjančių cementinių mišinių ankstyvąjį džiūstamąjį traukumą didina, tačiau, ilgėjant kietėjimo trukmei nuo 90 iki 180 parų ir daugiau, – didina nežymiai, palyginti su kontrolinio mišinio džiūstamuoju traukumu.

Remiantis LST EN 934-2:2009+A1:2012, pagal plastifikuojančios įmaišos tipą jos efektyvumas mažinti vandens poreikį, reikalingą tos pačios konsistencijos betono mišiniui paruošti, skiriasi: plastiklio – nuo 5 % ir daugiau, o superplastiklio – nuo 12 % ir daugiau. Naudojant plastifikuojančią įmaišą bei nekeičiant betono mišinio konsistencijos ir (arba) betono stipruminių savybių, galima sumažinti atitinkamai vandens kiekį ir (arba) cementinės teslos (vandens ir cemento) kiekį mišinyje. ACI 212.3R-16 (American Concrete Institute 212, 2016) apie betono chemines įmaišas teigiama, kad superplastikliai gali padidinti betono džiūstamąjį traukumą išlaikius pastovų betono V/C santykį ir cemento kiekį. Todėl galima daryti prielaidą, kad cheminių įmaišų, pasižyminčių plastifikavimo efektu, poveikis mažinti betono traukumą yra netiesioginis: mažinant vandens ir (arba) cementinės teslos kiekį.

Tokuda *et al.* (1981) ištyrė superplastiklių poveikį betono džiūstamajam traukumui. Tyrimui naudoti superplastikliai melamino (MSF), naftalino (NSF) sulforūgšties ir formaldehido kondensacijos produktų pagrindu. Traukumo tyrimui parinkta 10 skirtingų betono sudėčių su superplastikliais ir be jų (MSF ir NSF). Betonų cemento kiekis buvo pastovus –  $450 \text{ kg/m}^3$ , o vandens kiekis kito nuo 133 iki  $170 \text{ kg/m}^3$ . Santykis tarp smulgiojo (smėlio) ir stambiojo (žvirgždo skaldos) užpildo kiekį išlaikytas pastovus – 34 %. Betono mišinių konsistencija (slankumas) buvo pastovi – apie  $8 \pm 2 \text{ cm}$ . Plastifikuojančios įmaišos kiekis nuo cemento masės parinktas eksperimentiniu būdu, mažinant vandens poreikį vienodos konsistencijos betono mišiniams paruošti 0, 8, 13 ir 20 %. Betono traukumo deformacijos buvo matuotos 350 parų, nuo mišinių maišymo pradžios praėjus 1 kietėjimo parai. Pažymėtina, kad traukumas matuotas bandinių ( $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ ), kurie pirmąsias 28 paras buvo kietinti vandeniui, o toliau sandėliuoti kontroliuojamoje aplinkoje (oro temperatūra  $20^\circ \text{C}$ , o santykinė oro drėgmė 50 %). Nustatyta, kad superplastikliai mažina vandens poreikį vienodos konsistencijos betono mišiniams paruošti iki 20 % (esant 1,5 % NSF kiekiui nuo cemento masės), tai lėmė mažesnes betonų džiūstamojo traukumo deformacijas viso kietėjimo metu, palyginti su betonų be plastifikuojančių įmaišų. Traukumo deformacijų reikšmės po 350 kietėjimo parų skyrėsi 12 %.

Qian *et al.* (2016) ištyrė plačiai naudojamų plastifikuojančių įmaišų poveikį betono bendrajam traukumui. Tyrimams parinkta betonų sudėtis su plastikliais polinaftalino pagrindu (P-NF1 ir P-NF2) ir superplastikliais polikarboksilatų akrilinių rūgščių (SP-J1 ir SP-J3) ir esterio maleino rūgščių (SP-J2, SP-J4, SP-J5) pagrindu. Betonų traukumo deformacijos buvo matuotos 360 parų, nuo mišinių maišymo pradžios praėjus 1 kietėjimo parai. Pažymėtina, kad traukumas matuotas bandinių ( $130 \times 130 \times 400 \text{ mm}$ ), kurie pirmąsias 7 paras buvo kietinti van-

deniu, o toliau sandėliuoti kontroliuojamoje aplinkoje (oro temperatūra  $20 \pm 1$  °C, o santykinė oro drėgmė  $60 \pm 5$  %). Nustatyta, kad superplastikliai labiau padidina cemento hidratacijos laipsnį ir sumažina betono makroporų poringumą, palyginti su plastikliais, dėl efektyvesnio cemento dalelių dispergavimo efekto. Be to, palyginti su plastiklio, superplastiklio efekto poveikis sumažinti vandens poreikį vienodos konsistencijos betono mišiniams paruošti yra didesnis. Tai paaiškina ma tuo, kad plastiklio veikimo mechanizmas pagrįstas tik elektrostatiiniu cemento dalelių dispergavimu, o superplastiklio – dar ir papildomu erdvinio atstūmimo efektu. Ištirta, kad superplastikliai betone suformuoja smulkesnes kapiliarines poras, palyginti su plastikliais, ir sumažina porose esančio vandens paviršiaus įtempius. Tai lemia, kad betono su superplastikliu J1, J2, J3, J4 ar J5 bendrasis traukumas yra mažesnis nei betono su plastikliu N1 ar N2. Ištirta, kad betono su superplastikliu SP-J1 (PCA-J1) traukumas mažiausias. Betono traukumo deformacijų reikšmės po 360 parų, palyginti su PCA-J1, skiriasi taip: su N1 – 65 %; N2 – 55 %; J2 – 30 %; J3 – 15 %; J4 – 25 %; J5 – 40 %. Mokslininkas savo darbe siūlo atkreipti dėmesį į tai, kad plastifikuojančių įmaišų (besiskiriančių ir savo veikimo mechanizmu), kurios efektyviai mažina vandens poreikį mišinyje ir *per se* nežymiai didina betono traukumą, poveikis vienodos konsistencijos kietėjančių cementinių mišinių traukumui iki šiol nėra pakankamai ištirtas.

Vimonsatit *et al.* (2015), Tokuda *et al.* (1981), Bogas *et al.* (2014) ir Hu *et al.* (2017) nuomone, superplastikliai turi dvejopą poveikį betono džiūstamajam traukumui: viena vertus, netiesiogiai mažina – dėl mažėjančio vandens poreikio (didinant plastifikuojančios įmaišos kiekį ir didėjant jos plastifikavimo efektyvumui) vienodos konsistencijos betono mišiniams paruošti, kita vertus, didina – dėl didėjančio cemento hidratacijos laipsnio ir cementinio gelio savitojo paviršiaus (didinant plastifikuojančios įmaišos kiekį ir didėjant jos dispergavimo efektui). Mokslininkai teigia, kad tinkamai parinkus chemines įmaišas, kurios efektyviai sumažina vandens poreikį vienodos konsistencijos mišiniui paruošti ir, sumažinus V/C santykį ir cemento kiekį, betono traukumo deformacijas galima sumažinti ne mažiau kaip 10 %.

Orą įtraukiančių įmaišų poveikis. Piasta ir Sikora (2015) ištyrė įtraukto oro kiekio poveikį betono su skirtingo tipo cementu bendrajam traukumui (savaiminiam ir džiūstamajam). Tyrimams naudotas skirtingo tipo cementas: portlandcementis CEM I 42,5 R (CIR), sudėtinis klinties portlandcementis CEM II/A-LL 42,5 R (CIALLR), sudėtinis šlakinis portlandcementis CEM II/B-S 42,5 N (CIIBSN) ir sudėtiniai šlakiniai cementai CEM III/A 42,5 N (CIIIA1N) ir CEM III/A 42,5 N (CIIIA2N). Cementuose esantis mineralinio priedo kiekis: CIALLR – 14 % klinčių; CIIBSN, CIIIA1N, CIIIA2N – atitinkamai 32, 50 ir 55 % granuluoto aukštakrosnių šlako. Papildomam oro kiekiui įvesti (nuo 2 iki 8 %) į betono mišinį naudota AEA (nuo 0,15 iki 0,31 % cemento masės) sintetinio natrio alkilo sulfonato pagrindu. Betono traukumo deformacijos buvo matuo-

tos 180 ir 300 parų, nuo mišinių maišymo pradžios praėjus 1 kietėjimo parai. Tyrimo metu betono bandiniai ( $100 \times 100 \times 500$  mm) kietinti kontroliuojamoje aplinkoje (oro temperatūra  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o santykinė oro drėgmė  $55 \pm 5\%$ ). Atlikus tyrimą nustatyta, kad didinant įtraukto oro kiekį, betono traukumas didėja. Ištirta, kad CIIALLN, CIIBSN ir CIIIA2N betonų su įtrauktu oru (atitinkamai 5,8, 5,2 ir 5,4 %) traukumo deformacijos viso kietėjimo metu padidėja, palyginti su kontrolinių CIIALLN, CIIBSN ir CIIIA2N betono bandinių. Traukumo deformacijų reikšmės po 300 kietėjimo parų skiriasi atitinkamai 10, 33 bei 32 %. Ištirta, kad CIR ir CIIIA1N betonų su įtrauktu oru (7,8 ir 8,1 %) traukumo deformacijos padidėja, palyginti su kontrolinių CIR ir CIIIA1N betono bandinių. Traukumo deformacijų reikšmės po 180 kietėjimo parų skyrėsi atitinkamai 70 ir 40 %. Mokslininkų nuomone, traukumo deformacijų didėjimas gali būti susijęs su: mišinyje didėjančiu cementinės teslos tūriu ir tuo metu mažėjančiu užpildo tūriu; mišinyje esančiomis oro tuštumomis bei poringėsne sąsaja (kontaktine zona) tarp oro tuštumų ir teslos. Pastarajai sąsajai tarpusavyje jungiantis ir persidengiant didėja betono garavimo difuzija, o dėl šios didėja drėgmės praradimas iš betono, taigi didėja džiūstamojo traukumo deformacijos.

Rišimosi lėtiklių poveikis. Nors skirtingų lėtiklio rūšių poveikis cementinių mišinių plastiniam (Combrinck ir Boshoff, 2013) ar savaiminiam traukumui (Yang *et al.*, 2017) yra plačiai išnagrinėtas, iki šiol nėra daug atliktų tyrimų, kuriais būtų siekiama ištirti lėtiklio poveikį cementinių mišinių džiūstamajam traukumui. Vieną iš tokių tyrimų atliko Scholer (1975), ištyręs skirtingų lėtiklių poveikį betono mišinių džiūstamajam traukumui. Tyrimams naudoti lėtikliai (lignosulfonatų, hidroksirūgščių, angliavandenių, glikolio rūgščių bei sacharozės pagrindu) buvo atrinkti iš 65 skirtingų rūšių pagal didžiausią jų efektyvumą. Betono mišinių, kurie pirmąsias 7 paras buvo kietinti vandeniui, o toliau sandėliuoti kontroliuojamoje aplinkoje (oro temperatūra  $26 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o santykinė oro drėgmė  $50 \pm 5\%$ ), traukumo deformacijos matuotos 180 parų, nuo mišinių maišymo pradžios praėjus 1 kietėjimo parai. Ištirta, kad visų rūšių lėtikliai betono džiūstamajam traukumui, kai cemento hidratacijos laipsnis ne mažesnis kaip 40 %, viso kietėjimo metu žymaus poveikio neturėjo, o kai mažesnis kaip 40 % – lėtiklis didina traukumą, kurio deformacijų dydis priklauso nuo jo rūšies ir kiekio.

Rišimosi greitiklių poveikis. Atliekant literatūros analizę galima pastebėti, kad skirtingų greitiklio rūšių poveikis cementinių mišinių plastiniam (Combrinck ir Boshoff, 2013) ar savaiminiam traukumui (Meagher *et al.*, 2015) yra plačiai išnagrinėtas, tačiau iki šiol nėra išsamiai ištirta jų poveikio mišinių džiūstamajam traukumui. Vieną iš tokių tyrimų atliko Shideler (1952), ištyręs  $\text{CaCl}_2$  poveikį betono džiūstamajam traukumui. Visų tirtų betono bandinių V/C santykis buvo pastovus – 0,52. Betono mišinių, kurie pirmąsias 14 parų buvo kietinti vandeniui, o toliau sandėliuoti kontroliuojamoje aplinkoje (oro temperatūra  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o santykinė oro drėgmė 50 %), traukumo deformacijos matuotos 550

parų, nuo mišinių maišymo pradžios praėjus 1 kietėjimo parai. Nustatyta, kad didinant  $\text{CaCl}_2$  kiekį nuo 1 ar 2 iki 3 % nuo cemento masės, betono traukumo deformacijos per visą kietėjimo trukmę padidėja nuo 10 iki 20 %. Shanahan *et al.* (2016) nuomone, betono traukumas galėjo padidėti dėl susiformuojančio smulkesnio cementinio gelio. Be to, mokslininkai nustatė, kad  $\text{CaCl}_2$  netiesiškai keičia betono mišinyje esančių porų pagal dydį išsidėstymą, – didina porų, kurių dydis nuo 10 iki 20 nm, kiekį.

Klampą modifikuojančių įmaišų poveikis. Iki šiol nedaug tyrimų buvo atlikta siekiant ištirti klampą modifikuojančios įmaišos (VMA) poveikį cementinių mišinių traukumui. Tik keletas tyrėjų vertino VMA poveikį cementinių mišinių savaiminiam ir džiūstamajam traukumui. Valcuende *et al.* (2012) ištyrė klinties mikroužpildo ir VMA poveikį savaime sutankėjančio betono (SSB) bendrajam traukumui (savaiminiam ir džiūstamajam). Visų tirtų betono bandinių V/C santykis buvo pastovus – 0,60. Betonų traukumo deformacijos buvo matuotos 365 paras, nuo mišinių maišymo pradžios praėjus 2 kietėjimo paroms. Tyrimo metu bandiniai kietinti kontroliuojamoje aplinkoje (oro temperatūra 20 °C, o santykinė oro drėgmė 50 %). Nustatyta, kad SSB, modifikuoto klintimis (45, 90 ar 125 kg/m<sup>3</sup>), bendrasis traukumas yra nežymiai didesnis, palyginti su kontrolinio normaliojo betono, – skirtumas ne daugiau kaip 9,2 %. Ištirta, kad kontrolinio SSB džiūstamasis traukumas yra didesnis nei kontrolinio normaliojo betono, tačiau SSB, modifikuotas VMA (0,35 ar 0,5 % nuo cemento masės), pasižymi iki 7,7 % mažesniu bendroju traukumu. SSB, kuriame klinties mikroužpildas buvo pakeistas VMA, pasižymi mažesniu džiūstamuoju traukumu iki 33 %, tai lėmė sumažėjęs kapiliarinis slėgis dėl sustambėjusios SSB porų struktūros. VMA sumažino ir vandens garavimą iš betono prisirišus jos polimerams prie H<sub>2</sub>O vandenilio.

#### **1.4.4. Traukumą mažinančių įmaišų veikimo mechanizmas ir poveikis cementinių mišinių džiūstamajam traukumui**

Pastaruoju metu plačiai paplito traukumą mažinančių įmaišų (SRA) naudojimas cementiniuose mišiniuose, kaip vienas iš būdų, kuriuo galima kontroliuoti ir mažinti kietėjančių mišinių ne tik plastinį (Lura *et al.*, 2007; Saliba *et al.*, 2011; Leemann *et al.*, 2014) ir savaiminį (Ran *et al.*, 2013; Matulová ir Uncik, 2015; Rongbing ir Jian, 2005; Zuo *et al.*, 2017; Saito *et al.*, 2010), bet ir džiūstamąjį traukumą.

He *et al.* (2006) ištyrė SRA poveikį cementinių skiedinių (25×25×280 mm) džiūstamajam traukumui kontroliuojamoje aplinkoje (oro temperatūra 20±1 °C, o santykinė oro drėgmė 50±3 %). Nustatyta, kad skiedinio su 1 % SRA kiekiu džiūstamasis traukumas po 3, 7 ir 28 parų (nuo mišinio maišymo pradžios praėjus 1 kietėjimo parai) sumažėjo atitinkamai 60, 40 ir 20 %, palyginti su skiedinio



be SRA. Kituose panašiuose tyrimuose Maia *et al.* (2012), Gettu ir Roncero (2005) nustatė, kad betono su 1,5–5 % SRA džiūstamasis traukumas po 300 kietėjimo parų sumažėjo atitinkamai nuo 38 iki 85 %, palyginti su betono be SRA.

Atliekant literatūros analizę galima pastebėti, kad dažnai skiriasi SRA efektyvumas mažinti tos pačios cementinio mišinio rūšies (tešlos, skiedinio ar betono) džiūstamąjį traukumą (Ran *et al.*, 2013; Mehdipour ir Khayat, 2018; Saliba *et al.*, 2011; Tioua *et al.*, 2017). Anot Zhan ir He (2019), SRA efektyvumas toms pačioms cementinėms sistemoms gali skirtis dėl skirtingų kietinimo sąlygų.

Weiss *et al.* (2008) ištyrė SRA poveikį cementinės tešlos džiūstamajam traukumui kontroliuojamoje aplinkoje (santykinė drėgmė buvo keičiama nuo 30 iki 95 %) ir nustatė, kad esant santykinai drėgmei 91 ar 95 %, cementinės tešlos traukumo deformacijoms 5 % SRA kiekis (nuo cemento masės) poveikio neturi. Tačiau kai santykinė drėgmė 30, 50 ir 70 %, tešlos su SRA džiūstamasis traukumas po 180 parų (nuo tešlos maišymo pradžios praėjus 1 kietėjimo parai) sumažėja atitinkamai 36, 42 ir 30 %, palyginus su tešla be SRA. SRA efektyvumas padidėja esant mažesnei santykinai oro drėgmei (nuo 30 iki 70 %) nei didesnei (91 ar 95 %).

Eberhardt (2011) nustatė, kad esant mažesnei nei 50 % santykinai oro drėgmei, SRA poveikis mažinti betono džiūstamąjį traukumą yra nežymus dėl stipriai padidėjusio skysčio ir oro sąlyčio paviršiaus ploto. Apibendrinus apžvelgtus tyrimus ir jų rezultatus galima teigti, kad ilgėjant betono kietėjimo trukmei, didėja skysčio ir oro sąlyčio paviršiaus plotas bei mažėja SRA koncentracija, o tai lemia SRA efektyvumo mažėjimą.

Zhan ir He (2019) atlikę palyginamąją literatūros analizę nustatė, kad didinant SRA kiekį cementinių mišinių džiūstamasis traukumas mažėja. SRA veikimo mechanizmas esant skirtingoms traukumo rūšims, savaiminio ir džiūstamojo, yra panašus: sumažina cementinio mišinio porose esančio tirpalo paviršiaus įtempius (Kovler ir Bentur, 2009; Zhang *et al.*, 2009; Plank *et al.*, 2015) bei jonų koncentraciją ( $K^+$ ,  $Na^+$ ) (Zuo *et al.*, 2017; Ran *et al.*, 2013), cementiniame mišinyje tolygiai paskirsto santykinę drėgmę (Bentz *et al.*, 2001; Bentz, 2005; Sant *et al.*, 2006), sukelia cementinio mišinio tūrinį padidėjimą ankstyvosios kietėjimo stadijos metu (Berger ir McGregor, 1972; Sant, 2009; Sant, 2012; Monosi *et al.*, 2011; Zuo *et al.*, 2017).

Yoo *et al.* (2016) nustatė, kad SRA sumažina skysčio pasišalinimą bei garavimą iš cementinių mišinių ir kad cementinio mišinio porose esančio skysčio paviršiaus įtempio dydis priklauso nuo porų, iš kurių išgaruoja skystis, dydžio, esant skirtingai santykinai drėgmei. Hua ir Young (1997) teigia, kad esant santykinai didelei santykinai drėgmei, džiūstamojo traukumo mechanizmas grindžiamas kapiliariniais įtempiais. Iš kietėjančio cementinio mišinio kapiliarų garuojant porų skysčiui vis didesni skysčio įtempiai perduodami porų sienelėms – tai lemia džiūstamojo traukumo didėjimą. Tačiau, kai cementinių mišinių su

SRA santykinė drėgmė padidinama iki tam tikro lygio, siekiant efektyviai sumažinti džiūstamąjį traukumą, kuris daugiausia priklauso nuo porų paviršiaus įtempių, meniskai ir kapiliariniai įtempiai išnyksta dėl riboto porų dydžio. Pavyzdžiui, Ribeiro *et al.* (2006) nustatė, kad santykinė drėgmė cementinėje tešloje, kai SRA kiekis yra 5 % (nuo cemento masės), gali būti apie 84 %, o Kelvino spindulys 3 nm. Priešingu atveju, kai santykinė drėgmė santykinai maža, džiūstamojo traukumo mechanizmas grindžiamas pleištinio slėgiu, kurio metu stūmos jėgos tarp skysčiu užpildytų porų priešinasi paviršiaus jėgoms – Van der Valso traukos arba statinėms jėgoms (Eberhardt ir Flatt, 2016). Ribeiro *et al.* (2006) nustatė, kad SRA mažina betono kapiliaruose esančio skysčio paviršiaus įtempius, kartu keičia ir porų sienelių paviršiaus energiją, kuri priklauso nuo poringos sistemos bendrojo paviršiaus ploto.

Eberhardt (2011) ištyrė SRA poveikį betono džiūstamajam traukumui. Mokslininkas teigia, kad dėl traukumo atsiradusi laisvoji Helmholtz energija yra panaudojama dviejuose procesuose: deformacijai bei skysčio ir oro sąlyčio paviršiaus ploto sukūrimui. SRA padidina energijos dalį, kuri panaudojama skysčio ir oro sąlyčio paviršiaus ploto sukūrimui, sumažinant betono kapiliaruose esančio skysčio paviršiaus įtempius. Kadangi mažiau energijos lieka deformacijai, todėl betono traukumas sumažėja.

#### **1.4.5. Mineralinių priedų betonui poveikis cementinių mišinių džiūstamajam traukumui**

Piasta ir Sikora (2015) ištyrė skirtingo mineralinio priedo (cemento pakaitos) ir jo kiekio portlandcementyje poveikį betono bendrojo traukumo (savaiminio ir džiūstamojo) deformacijoms. Tyrimams naudotas skirtingo tipo cementas: portlandcementis CEM I 42,5 R (CIR), sudėtinis klinties portlandcementis CEM II/A-LL 42,5 R (CIALLR), sudėtinis šlakinis portlandcementis CEM II/A-S 42,5 N (CIASN) ir CEM II/B-S 42,5 N (CIIBSN) bei sudėtinis šlakinis cementas CEM III/A 42,5 N (CIIIA2N). Cemente esantis mineralinio priedo kiekis: CIALLR – 14 % klinčių; CIASN, CIIBSN, CIIIA2N – 17, 32 ir 55 % granuliuoto aukštakrosnių šlako. Mokslininkams siekiant atlikti išsamesnį tyrimą, skirtinga betono sudėtis parinkta su orą įtraukiančia įmaiša ir be jos. Papildomam oro kiekiui įvesti (nuo  $2,5 \pm 0,5$  iki  $5,5 \pm 0,5$  %) į betono mišinį naudota AEA sintetinio natrio alkilo sulfonato pagrindu. AEA kiekis kito atitinkamai nuo 0,15 iki 0,23 % nuo cemento masės. Betono traukumo deformacijos buvo matuotos 300 parų, nuo mišinių maišymo pradžios praėjus 1 kietėjimo parai. Tyrimo metu betono bandiniai ( $100 \times 100 \times 500$  mm) kietinti kontroliuojamoje aplinkoje (oro temperatūra 20 °C, o santykinė oro drėgmė  $55 \pm 5$  %). Nustatyta, kad keičiant 17, 32 ir 55 % portlandcemenčio klinkerio dalį granuliutu aukštakrosnių šlaku, betono, kuriame oro kiekis atitinkamai 2,3, 2,0 ir 2,2 % (arba 5,6, 5,2 ir 5,4 %),

traukumo deformacijos sumažėja, o jų reikšmės po 300 kietėjimo parų skiriasi 10, 40 ir 50 %, palyginti su betonų be mineralinio priedo. Ištirta, kad keičiant 14 % portlandcemenčio klinkerio dalį klintimis, betono traukumo deformacijos taip pat sumažėja. Traukumo deformacijų reikšmės po 300 kietėjimo parų skiriasi 4 % (kai oro kiekis betone – 2,4 %) ir 8 % (kai oro kiekis betone – 5,8 %), palyginti su betono be mineralinio priedo. Vienas iš pagrindinių bendrąjį traukumą lemiančių veiksnių yra santykinai greita portlandcemenčio klinkerio hidratacija ir džiūvimas. Todėl mokslininkų nuomone, betonų, kuriuose cemento dalis pakeista mineraliniu priedu (klintimis ar granuliuotu aukštakrosnių šlaku), traukumo deformacijų sumažėjimas susijęs su: portlandcemenčio klinkerio sumažėjimu; mineraliniu priedu, kuris mažina cemento hidratacijos kinetiką, kadangi pasižymi mažesniu reaktyvumu ir (arba) veikia kaip mikroužpildas kietėjančioje cementinėje tesloje.

Rao (1998) ištyrė  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių (SF) poveikį cementinio skiedinio džiūstamajam traukumui. Tyrimams kontrolinio skiedinio sudėtis buvo modifikuota pakeitus portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 0 iki 30 % SF. Visų tirtų skiedinių V/K santykis buvo pastovus – 0,50. Cementinių skiedinių, modifikuotų SF, traukumo deformacijos matuotos nuo skiedinių maišymo pradžios praėjus 28 ir 405 kietėjimo paroms. Tyrimo metu skiediniai kietinti kontroliuojamoje aplinkoje (oro temperatūra  $35 \pm 2$  °C, o santykinė oro drėgmė  $65 \pm 5$  %). Nustatyta, kad padidinus cemento pakaitos (SF) kiekį nuo 0 iki 30 %, cementinio skiedinio traukumo deformacijos po 28 kietėjimo parų padidėjo. Tačiau po 405 kietėjimo parų – traukumo deformacijų reikšmės mažai kito, palyginti su nustatytomis reikšmėmis po 28 kietėjimo parų. Mokslininko nuomone, pagrindinis veiksnys, lėmęs, kad didėjant cemento pakaitos kiekiui didėja skiedinių traukumo deformacijos – didėjantis kalcio hidrosilikatų kiekis cementiniame akmenyje.

Chindaprasirt *et al.* (2004) ištyrė FA, įvertinę ir jų smulkumą, poveikį cementinio skiedinio džiūstamajam traukumui dviem skirtingais etapais. Pirmuoju – prasijojus FA pro 74 ir 44  $\mu\text{m}$  sietus, o antruoju – oro skirtuvu suskirsčius FA į 3 frakcijas pagal dalelių dydį – smulkiąją, tarpinę tarp smulkiosios ir stambiosios ir stambiają. Tyrimams parinktos skiedinio sudėtys buvo modifikuotos keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį 40 % originaliais, prasijotais pro sietus ar suskirstytais į atskiras frakcijas oro skirtuvu lakiaisiais pelenais. Skiedinių džiūstamojo traukumo deformacijos buvo matuotos 100 parų, nuo skiedinių maišymo pradžios praėjus 1 kietėjimo parai. Nustatyta, kad pakeitus portlandcemenčio klinkerio dalį 40 % originaliais FA, skiedinių džiūstamasis traukumas buvo mažesnis viso kietėjimo metu, palyginti su kontrolinio skiedinio ar su skiediniu, kuriuose FA dalelių dydis buvo ne didesnis kaip 74 ir 44  $\mu\text{m}$ . Ištirta, kad pakeitus portlandcemenčio klinkerio dalį 40 % FA, kurių dalelių dydis ne didesnis kaip 74 ar 44  $\mu\text{m}$ , skiedinio traukumo deformacijos nežymiai skyrėsi pirmąsias 7 kietėjimo paras, palyginti su kontrolinio skiedinio. Tačiau ilgėjant kietėjimo

trukmei, skiedinių traukumo deformacijos pasiekė panašias reikšmes kaip skiedinio, modifikuoto originaliais FA. Taip pat buvo ištirta, kad pakeitus portlandcemenčio klinkerio dalį 40 % originaliais FA ar smulkiosios (tarpinės tarp smulkiosios) ir stambiosios FA frakcijos dalimi, skiedinių džiūstamasis traukumas buvo mažesnis viso kietėjimo metu, palyginti su kontrolinio skiedinio ar su skiedinio, kuriame naudota stambioji FA frakcijos dalis. Skiedinių su stambiaja FA frakcijos dalimi džiūstamojo traukumo deformacijos buvo nežymiai mažesnės viso kietėjimo metu, palyginti su kontrolinio skiedinio.

Itim *et al.* (2011) ištyrė skirtingų mineralinių priedų poveikį cementinio skiedinio bendrajam traukumui (savaiminiam ir džiūstamajam). Skiedinių, modifikuotų klinčių mikroužpildu, natūraliais pucolanais bei GGBFS, savaiminio ir džiūstamojo traukumo deformacijos buvo matuotos 365 paras, nuo skiedinių maišymo pradžios praėjus 1 kietėjimo parai. Visų tirtų skiedinių V/K santykis buvo pastovus – 0,47. Nustatyta, kad keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį 5, 15 ir 25 % klintimis ar 10, 20 ir 30 % natūraliais pucolanais, skiedinių savaiminio traukumo deformacijos didėja per pirmąsias 3 kietėjimo paras. Tačiau toliau ilgėjant kietėjimo trukmei, savaiminio traukumo deformacijų reikšmės mažai skiriasi, palyginti su skiedinio be klinties ar natūralaus pucolaninio mineralinio priedo. Ištirta, kad klinties priedas ir natūralūs pucolanai didelės įtakos cementinių skiedinių džiūstamajam traukumui visą kietėjimo laiką neturi, o nustatytos traukumo deformacijų reikšmės mažai skiriasi, palyginti su skiedinių be atitinkamų mineralinių priedų. Pakeitus portlandcemenčio klinkerio dalį 10 % GGBFS, skiedinių savaiminio traukumo deformacijos nežymiai padidėjo viso kietėjimo metu, išskyrus pirmąsias 3 kietėjimo paras. Tačiau didesni GGBFS kiekiai (30 ir 50 %) lėmė mažesnes skiedinio savaiminio traukumo deformacijas. Kita vertus, 10 % GGBFS sumažino skiedinio džiūstamąjį traukumą viso kietėjimo metu, o didesni cemento pakaitos kiekiai padidino. Dellinghausen *et al.* (2012) nustatė, kad betono, kurio portlandcemenčio klinkerio dalis pakeista 50 % ar 70 % GGBFS, bendrasis traukumas yra panašus visą kietėjimo laiką, palyginti su betono be priedo, tačiau su tokio pat V/K santykiu (0,30, 0,42 ir 0,55).

Li ir Yao (2001) ištyrė GGBFS ir SF poveikį didelio stiprumo betono džiūstamajam traukumui. Tyrimui buvo parinktos trys betono sudėty: kontrolinė ir dvi modifikuotos mineraliniais priedais (vienoje – portlandcemenčio klinkerio dalis pakeista atitinkamai 30 % GGBFS, o kitoje – 30 % GGBFS ir 10 % SF). Betonų traukumo deformacijos buvo matuotos 180 parų, nuo mišinių maišymo pradžios praėjus 28 kietėjimo paroms. Nustatyta, kad betonų, modifikuotų mineraliniais priedais, džiūstamasis traukumas yra mažesnis, palyginus su betono be priedų, visą kietėjimo laiką. Ištirta, kad papildomai keičiant 10 % portlandcemenčio klinkerio dalį SF gaunamas mažesnis betono traukumas, palyginti su

betono, modifikuoto tik GGBFS. Tačiau gautos traukumo deformacijų reikšmės mažai skiriasi, palyginus su betono be mineralinių priedų.

## 1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Cementiniams mišiniams būdingas laminarinis tekėjimas sluoksniais ir ribinių šlyties įtempių bei plastinės klampos reologinės charakteristikos, kurioms nustatyti taikomas Binghamo modelis.
2. Cementinius mišinius veikiant mechaniniu poveikiu dėl jų struktūros pokyčių keičiasi ribinių šlyties įtempių vertė, kurią apibūdina struktūros atsistatymo rodiklis.
3. Mišinių reologinės savybės labiausiai priklauso nuo kietųjų dalelių koncentracijos, užpildo dalelių formos, skystosios fazės sudėties (įvairių cheminių įmaišų kiekių), mikroužpildo tipo ir kiekio.
4. Betono mišinių traukumą sukelia kapiliarinės jėgos, susidarančios garuojant vandeniui iš kapiliarinių porų, todėl traukumas daugiausia priklauso nuo vandens kiekio mišinyje ir kapiliarinių porų kiekio.
5. Traukumą mažinanti įmaiša mažina betono kapiliaruose esančio vandens paviršiaus įtempius, kartu keičia porų sienelių paviršiaus energiją, kuri priklauso nuo poringosios sistemos bendrojo paviršiaus ploto.

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia išspręsti šiuos uždavinius:

1. Nustatyti cheminių įmaišų ir mineralinių priedų poveikį cementinių tešlų reologinėms savybėms ir tiksotropiškumui, esant skirtingoms technologinėms sąlygoms;
2. Nustatyti cheminių įmaišų ir mineralinių priedų poveikį cementinių mišinių džiūstamojo traukumo deformacijoms;
3. Nustatyti vandens kiekio, cemento tešlos kiekio ir oro kiekio poveikį cementinių mišinių džiūstamojo traukumo deformacijoms;
4. Įvertinti cheminių įmaišų ir mineralinių priedų plastifikavimo efektyvumo įtaką projektinių technologinių savybių cementinių mišinių džiūstamajam traukumui.



---

## Žaliavų ir tyrimų metodikos apžvalga

Šiame skyriuje apžvelgiamos darbe naudotos žaliavos, pateikiamos jų savybės ir charakteristikos, mišinių sudėtis. Aprašomas mišinių ruošimas, bandinių formavimas bei jų paruošimas bandymams. Išsamiai apžvelgiama įranga bei tyrimų metodika.

Šio skyriaus medžiaga paskelbta šešiuose straipsniuose (Macijauskas ir Gailius, 2013; Skripkiūnas *et al.*, 2016; Macijauskas ir Skripkiūnas, 2017; Macijauskas ir Girskas, 2017; Macijauskas ir Skripkiūnas, 2018; Skripkiūnas *et al.*, 2018) ir pristatyta keturioje mokslinėse konferencijose.

### 2.1. Naudotos medžiagos

Tyrimams naudotas skirtingo tipo cementas (pagal LST EN 197-1:2011): portlandcementis CEM I 42,5 R (CIR), CEM I 42,5 N (CIN) ir CEM I 42,5 N SR3 (CINSR3; mažiau C<sub>3</sub>A) ir sudėtinis portlandcementis CEM II/A-S 42,5 N (CIASN) ir CEM II/A-LL 42,5 N (CIALLN), kurių klinkerio dalis (17 %) pakeista atitinkamai granuliuotu aukštakrosnių šlaku ir klintimis. Cementas pagamintas AB „Akmenės cementas“, Naujojoje Akmenėje.

Rišamųjų medžiagų fizikinės ir mechaninės savybės bei mineralinė ir cheminė sudėtis pateikta 2.1–2.3 lentelėse.

**2.1 lentelė.** Cemento fizikinės ir mechaninės savybės**Table 2.1.** Physical and mechanical properties of a cement

Savybės	Cementas				
	CIR	CIN	CINSR3	CIASN	CIALLN
Stipris gniuždant po 2 parų, MPa	29,8	25,4	23,8	23,1	23,4
Stipris gniuždant po 28 parų, MPa	56,4	53,6	52,5	54,9	51,8
Vandens poreikis normalaus tirštumo tešlai, %	27,6	24,2	25,4	25,2	25,8
Rišimosi pradžia, min	140	150	170	160	170
Rišimosi pabaiga, min	170	180	215	235	230
Dalelių tankis, kg/m <sup>3</sup>	3120	3180	3180	3100	3100
Piltinis tankis, kg/m <sup>3</sup>	1240	1180	1180	1100	1100
Savitasis paviršius, cm <sup>2</sup> /g	4198	3554	3697	3308	3945
Liekana ant 90 µm sieto, %	1,6	3,7	3,4	3,3	3,7
Tūrio pastovumas (plėtra), mm	1,0	1,0	1,0	2,0	1,0
Kaitmenys, masės %	2,1	2,3	1,95	1,24	5,8
Netirpmenys, masės %	0,25	0,2	0,81	0,42	0,38
Sulfatai (SO <sub>3</sub> ), masės %	2,9	2,9	2,38	2,66	2,6
Chloridai (Cl <sup>-</sup> ), masės %	0,009	0,01	0,09	0,01	0,008
Šarmai, skaičiuojant Na <sub>2</sub> O ekvivalentu, masės %	0,68	0,58	0,65	0,79	0,46

**2.2 lentelė.** Cemento mineralinė sudėtis**Table 2.2.** Mineral composition of a cement

Mineralinė sudėtis, %	Cementas				
	CIR	CIN	CINSR3	CIASN	CIALLN
C <sub>3</sub> S	53,56	53,05	59,79	57,31	44,49
C <sub>2</sub> S	17,23	17,33	18,90	13,8	16,64
C <sub>3</sub> A	1,43	2,41	2,39	2,05	3,26
C <sub>4</sub> AF	10,40	10,79	14,08	12,4	12,42



**2.3 lentelė.** Cemento cheminė sudėtis**Table 2.3.** Chemical composition of a cement

Cheminė sudėtis, %	Cementas				
	CIR	CIN	CINSR3	CIASN	CIALLN
SiO <sub>2</sub>	18,85	18,10	21,3	21,69	15,92
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,88	4,69	3,4	5,01	4,03
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,53	3,41	4,0	2,88	3,36
CaO	62,64	61,70	63,3	60,48	62,31
K <sub>2</sub> O	1,13	1,11	0,58	1,00	1,04
SO <sub>3</sub>	3,47	3,51	2,5	2,97	3,17
Na <sub>2</sub> O	0,1	0,1	0,14	0,14	0,1
MgO	3,94	3,98	0,76	3,2	3,55

Darbe tiriami Lietuvos regione plačiai prieinami ir naudojami mineraliniai priedai: granuliuotas aukštakrosnių šlakas (GGBFS), lakieji pelenai (FA) ir SiO<sub>2</sub> mikrodulkės (SF). Tyrimams naudotų priedų fizikinės savybės bei cheminė sudėtis pateikta atitinkamai 2.4 ir 2.5 lentelėse.

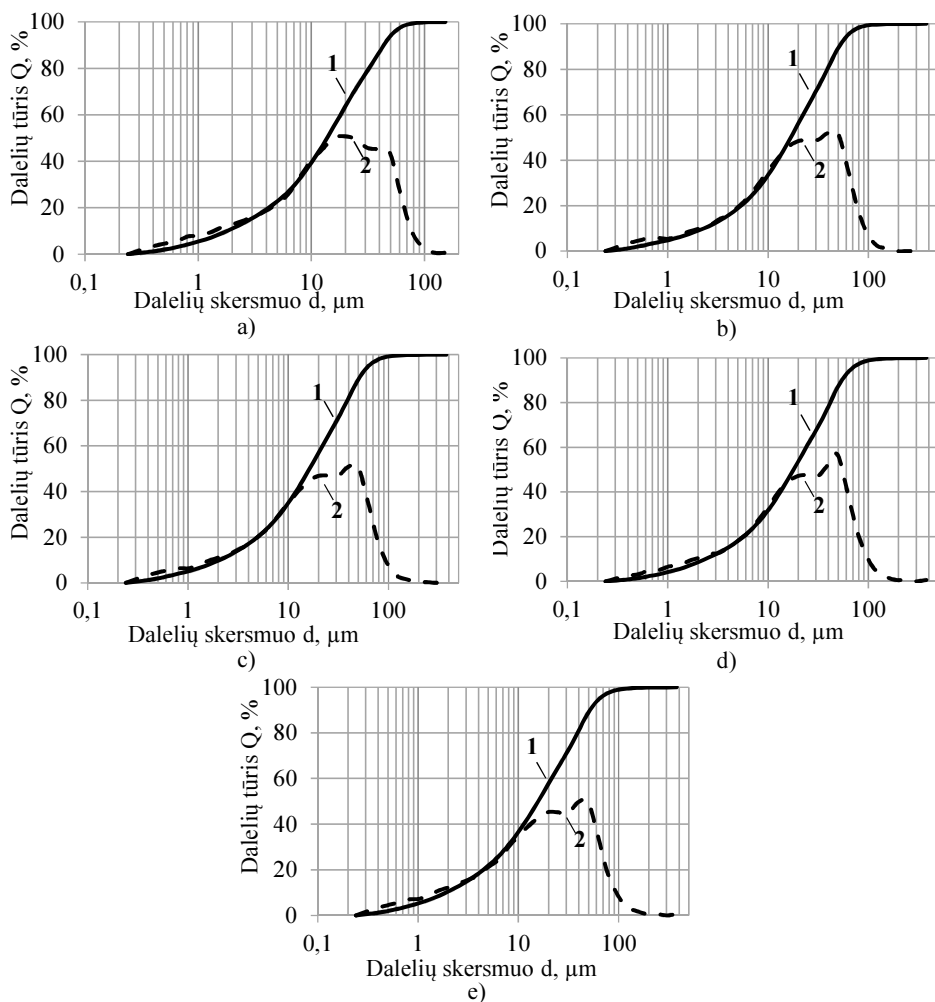
**2.4 lentelė.** Mineralinių priedų fizikinės savybės**Table 2.4.** Physical properties of mineral additives

Priedas	Fizikinės savybės	
	Dalelių tankis q, g/cm <sup>3</sup>	Savitasis paviršius SSA, cm <sup>2</sup> /g
GGBFS	2,58	1587
FA	2,04	3565
SF	2,20	24 000

**2.5 lentelė.** Mineralinių priedų cheminė sudėtis**Table 2.5.** Chemical composition of mineral additives

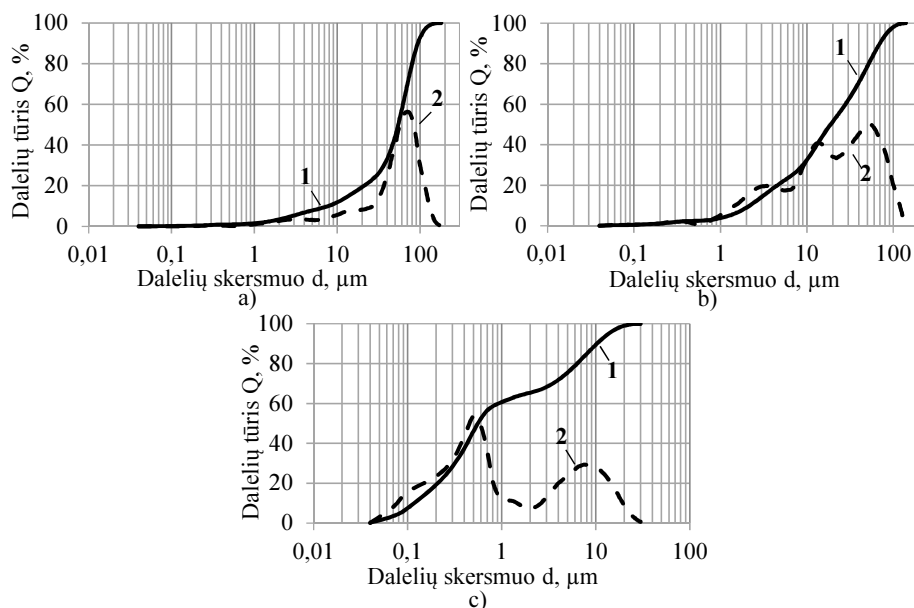
Priedas	Cheminė sudėtis, %							
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	K. n.
GGBFS	35,1	5,38	0,429	41,2	4,13	0,414	0,486	0,67
FA	49,8	19,1	7,03	6,92	1,58	1,82	0,787	–
SF	96,06	0,20	0,05	0,25	0,42	1,21	0,11	0,74

Darbe lazeriniu granulometru („CILAS 1090 Liquid“) sausuoju ir šlapiuoju būdu nustatytas skirtingo tipo cemento ir mineralinių priedų dalelių pasiskirstymas (granulometrija) ir jų dydis. Kaip dispersinė terpė naudotas vanduo, o kietųjų medžiagų kiekis suspensijoje 8–12 %. Dalelių dydis išmatuotas 0,01–500  $\mu\text{m}$  intervalu. Rezultatai pateikti 2.1–2.2 paveiksluose ir 2.6 lentelėje.



**2.1 pav.** Skirtingo tipo cemento dalelių pasiskirstymas pagal dydį: a) CIR; b) CIN; c) CINSR3; d) CIIASN; e) CIIALLN; 1 – santykinis dalelių pasiskirstymas pagal dydį; 2 – absoliutusias dalelių pasiskirstymas pagal dydį

**Fig. 2.1.** Different type cement particulate levels distribution by size: a) CIR; b) CIN; c) CINSR3; d) CIIASN; e) CIIALLN; 1 – Distribution of relative amount of particles according to size; 2 – Distribution of absolute quantity of particles by size



**2.2 pav.** Mineralinių priedų dalelių pasiskirstymas pagal dydį: a) GGBFS; b) FA; c) SF; 1 – santykinis dalelių pasiskirstymas pagal dydį; 2 – absoliutusias dalelių pasiskirstymas pagal dydį

**Fig. 2.2.** Mineral additive particulate levels distribution by size: a) GGBFS; b) FA; c) SF; 1 – Distribution of relative amount of particles according to size; 2 – Distribution of absolute quantity of particles by size

**2.6 lentelė.** Skirtingo tipo cemento ir mineralinių priedų dalelių pasiskirstymas pagal dydį

**Table 2.6.** Distribution of the particles according to size of different types of cement and mineral additives

Medžiaga	CIR	CIN	CINSR3	CIASN	CIALLN	GGBFS	FA	SF
Vidutinis dalelių dydis d, $\mu\text{m}$	21,26	26,04	24,78	28,21	23,97	53,55	28,77	3,16

Ištirta, kad skirtingo tipo cemento ir mineralinių priedų dalelių pasiskirstymas (2.1–2.2 pav.) ir dydis (2.6 lentelė) skiriasi. Nustatyta, kad vidutinis CIASN dalelių dydis (28,21  $\mu\text{m}$ ) yra didesnis nei kito cemento – CIR (21,26  $\mu\text{m}$ ), CIN (26,04  $\mu\text{m}$ ), CINSR3 (24,78  $\mu\text{m}$ ) ar CIALLN (23,97  $\mu\text{m}$ ). Taip pat nustatyta, kad vidutinis GGBFS dalelių dydis (53,55  $\mu\text{m}$ ) yra didesnis,

palyginti su kitais mineraliniais priedais – FA (28,77  $\mu\text{m}$ ) ar SF (3,16  $\mu\text{m}$ ). Pastebima, kad SF dalelės yra mažiausios.

Kaip smulkusis ir stambusis užpildas tyrimams buvo naudojamas Miškinių karjero (Trakų r., Lietuva) smėlis (0/4 frakcijos) ir granito skalda (2/5 frakcijos) iš karjero RUPP „Granit“ (Lunineco r., Baltarusija).

Granulimetrinė smėlio ir granito skaldos sudėtis, nustatyta pagal standarto LST EN 933-1:2012 reikalavimus, pateikta 2.7 lentelėje.

**2.7 lentelė.** Smėlio ir granito skaldos granulimetrinė sudėtis

**Table 2.7.** Granulometric composition of sand and granite gravel

Sieto akučių dydis d, mm	Išbyra B, %	
	Smėlis, 0/4 frakcijos	Granito skalda, 2/5 frakcijos
0	0	0
0,063	0,60	0,10
0,125	2,37	0,12
0,25	10,13	0,21
0,5	46,47	0,70
1	75,73	1,18
2	91,67	9,23
4	99,20	55,88
5,6	100	94,34
8	100	100
11,2	100	100

Smėlio fizikinės savybės: tankis – 2620  $\text{kg/m}^3$ , piltinis tankis – 1650  $\text{kg/m}^3$ , piltinis sutankintos būklės tankis – 1890  $\text{kg/m}^3$ , stambumo modulis – 2,6.

Granito skaldos fizikinės savybės: tankis – 2670  $\text{kg/m}^3$ , piltinis tankis – 1460  $\text{kg/m}^3$ , piltinis sutankintos būklės tankis – 1630  $\text{kg/m}^3$ .

Darbe taip pat tiriamos Lietuvos regione plačiai prieinamos ir naudojamos cheminės įmaišos: plastiklis (LS; modifikuotų lignosulfonatų pagrindu), superplastiklis (MAP; modifikuotų akrilo polimerų pagrindu), superplastiklis (PCE; polikarboksilato esterių pagrindu), orą įtraukianti įmaiša (AEA; paviršių aktyvinančių medžiagų pagrindu), rišimosi lėtiklis (SG; natrio gliukonato pagrindu), rišimosi greitiklis (CN; kalcio nitrato pagrindu), klampą modifikuojanti įmaiša (VMA; didelės molekulinės masės sintetinių kopolimerų pagrindu) ir traukumą mažinanti įmaiša (SRA; paviršių aktyvinančių medžiagų pagrindu).

Cheminų įmaišų fizikinės ir cheminės savybės bei rekomenduojami jų dozavimo kiekiai pateikti 2.8 lentelėje.

**2.8 lentelė.** Cheminių įmaišų techniniai duomenys**Table 2.8.** Technical information of chemical admixtures

Įmaiša	pH (20 °C)	Tankis, g/cm <sup>3</sup>	Maks. chloridų kiekis, %	Maks. šarmų kiekis (sk. Na <sub>2</sub> O ekviva- lentu), %	Veikliosios medžiagos koncentracija tirpale, %	Rekomenduo- jamas kiekis, % cemento masės
LS	8,00±1,00	1,20±0,03	≤0,05	≤6,00	39,00±2,00	0,5–0,8
MAP	6,50±1,00	1,06±0,02	<0,05	<2,50	22,00±1,00	0,6–1,2
PCE	6,00±1,00	1,06±0,01	≤0,10	≤0,10	27,00±1,00	0,6–1,2
AEA	7,00±1,00	1,00±0,02	≤0,05	≤0,5	3,5±0,3	0,04–0,4
SG	6,50±1,00	1,10±0,02	<0,05	<3,50	20,00±1,00	0,2–1,0
CN	6,00±1,00	1,48±0,03	<0,05	<0,1	50,00±2,50	0,5–2,0
VMA	7,50±1,00	1,02±0,02	<0,1	<0,1	5,5±0,5	1,0–2,0
SRA	6,50±1,00	0,91±0,02	<0,1	<0,1	0,5±0,5	0,7–2,0

**2.2. Mišinių sudėtis**

Siekiant ištirti cemento dalelių koncentracijos tešloje ir cheminių įmaišų (2.8 lentelė) bei mineralinių priedų (2.4 lentelė) poveikį tešlos reologinėms savybėms, tiriamų tešlų sudėtis pateikta 2.9–2.11 lentelėse.

Tiriant portlandcemenčio (CIR) dalelių koncentracijos tešloje (nuo 0,434 iki 0,518) poveikį jos reologinėms savybėms, tiriamų tešlų sudėtis pateikta 2.9 lentelėje.

**2.9 lentelė.** Tešlos su skirtinga portlandcemenčio (CIR) dalelių koncentracija sudėtis**Table 2.9.** Composition of the paste with a different concentration of a Portland Cement (CIR) particles

Tešlos žymuo	φt0	φt1	φt2	φt3	φt4	φt5	φt6
V/C	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42
Dalelių koncentracija tešloje (φ <sub>c</sub> )	0,518	0,504	0,490	0,476	0,462	0,448	0,434
Dalelių koncentracijos intervalo žingsnio dydis	0,014						

Siekiant įvertinti cheminių įmaišų (2.8 lentelė) poveikį portlandcemenčio tešlos reologinėms savybėms, tiriamų tešlų sudėtis pateikta 2.10 lentelėje. Cheminių įmaišų kiekiai parinkti pagal gamintojų rekomenduojamas dozavimo ribas.

**2.10 lentelė.** Cheminėmis įmaišomis modifikuotos portlandcemenčio (CIR) tešlos sudėtis

**Table 2.10.** Composition of the Portland cement (CIR) paste modified with chemical admixtures

Tešlos žymuo	LSt	MAPt	PCet	AEAt		SGt		CNt		VMAt	SRAt	
Įmaiša	LS	MAP	PCE	AEA		SG		CN		VMA	SRA	
V/C	0,32	0,30		0,32						0,42	0,32	
Įmaišos kiekis, % cemento masės	0,2–1,2	0,2–1,2	0,2–1,2	0,01–0,15	0,15–0,2	0,1–0,6	0,6–1,2	0,2–1,2	1,2–2,1	1,0–3,6	0,2–1,2	1,2–2,1
Įmaišos kiekio intervalo žingsnio dydis, %	0,2	0,2	0,2	0,02	0,05	0,1	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3

Siekiant įvertinti mineralinių priedų poveikį tešlos reologinėms savybėms, keičiama portlandcemenčio klinkerio dalis nuo 15 iki 60 % granuliuotu aukštakrosnių šlaku arba nuo 15 iki 60 % lakiaisiais pelenais, arba nuo 2 iki 10 % SiO<sub>2</sub> mikrodulkėmis. Tiriamų tešlų sudėtis pateikta 2.11 lentelėje. Mineralinių priedų kiekiai parinkti pagal gamintojų naudojamus priedų kiekius skirtingo tipo sudėtiniam cementui gaminti ir anksčiau atliktų mokslininkų tyrimų rezultatus.

**2.11 lentelė.** Mineraliniais priedais modifikuotos portlandcemenčio (CIR) tešlos sudėtis

**Table 2.11.** Composition of the Portland cement (CIR) paste modified with mineral additives

Tešlos žymuo	GGBFSt	FAt	SFt
Priedo tipas	GGBFS	FA	SF
V/K	0,32	0,30	
MAP, % cemento masės	0,8	0,6	0,8
Priedas, % cemento masės	15–60	15–60	2–10
Priedo kiekio intervalo žingsnio dydis, %	15	15	2

Pažymėtina, kad keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį mineraliniu priedu, jo kiekis tešloje buvo perskaičiuotas pagal CIR tankį.

Kiekviena cementinės tešlos sudėtis (2.9–2.11 pav.) suformuota imant 500 g cemento ir vandens, kad būtų gautas atitinkamas tešlos V/C santykis.

Siekiant ištirti vandens poreikio pokyčio, cementinės tešlos kiekio pokyčio, oro kiekio, traukumą mažinančios įmaišos ir jos kiekio bei skirtingo tipo cemento poveikį cementinių skiedinių džiūstamajam traukumui buvo suformuota skiedinių sudėtis (2.12–2.16 lentelės).

Vertinant vandens poreikio pokyčio įtaką kietėjančių skiedinių džiūstamajam traukumui buvo suformuota sudėtis, pateikta 2.12 lentelėje. Pirmoji sudėtis (Vsk0) yra kontrolinė. Nuo antrosios (Vsk1) iki septintosios (Vsk6) – mažintas vandens poreikis mišinyje, atitinkamai nuo 5 iki 30 % (intervalo žingsnio dydis – 5 %).

**2.12 lentelė.** Skiedinių su skirtingu vandens poreikiu sudėtis, 1 m<sup>3</sup>

**Table 2.12.** Composition of mortars with a different water demand, 1 m<sup>3</sup>

Skiedinio žymuo	Vsk0	Vsk1	Vsk2	Vsk3	Vsk4	Vsk5	Vsk6
Vandens poreikio sumažinimas $\Delta V$ , %	0	5	10	15	20	25	30
MAP X, %	0	0,2	0,4	0,6	1,0	1,6	2,4
Cementas (CIR) C, kg	404						
Vanduo V, l	214	203	191	180	169	155	142
Smėlis Sm, kg	1705	1733	1761	1789	1816	1844	1872
V/C	0,53	0,50	0,47	0,45	0,42	0,38	0,35

Tiriant cementinės tešlos pokyčio įtaką kietėjančių skiedinių džiūstamajam traukumui buvo suformuota skiedinių sudėtis, pateikta 2.13 lentelėje. Pirmoji sudėtis (CTsk0) yra kontrolinė. Nuo antrosios (CTsk1) iki šeštosios (CTsk5) – mažintas cementinės tešlos kiekis mišinyje, atitinkamai nuo 5 iki 25 % (intervalo žingsnio dydis – 5 %).

**2.13 lentelė.** Skiedinių su skirtingu tešlos kiekiu sudėtis, 1 m<sup>3</sup>

**Table 2.13.** Composition of mortars with a different content of paste, 1 m<sup>3</sup>

Skiedinio žymuo	CTsk0	CTsk1	CTsk2	CTsk3	CTsk4	CTsk5
Tešlos kiekis c, l	320	300	280	260	240	220
Tešlos sumažinimas $\Delta c$ , %	0	5	10	15	20	25
MAP X, %	0	0,2	0,4	0,8	1,6	3,6
Cementas (CIR) C, kg	404	382	360	338	317	295
Vanduo V, l	214	202	190	178	164	149
Smėlis Sm, kg	1705	1753	1801	1849	1898	1946
V/C	0,53	0,53	0,53	0,53	0,52	0,51

Mažinant vandens poreikį ar cementinės tešlos kiekį mišinyje ir siekiant išlaikyti pastovią jo konsistenciją (sklidumą), didintas superplastiklio kiekis (2.12 ir 2.13 lentelės). Pažymėtina, kad Vsk4, Vsk5 ir Vsk6 bei CTsk4 ir CTsk5 skiedinių sudėtyje labai padidinamas plastifikuojančios cheminės įmaišos kiekis, kad būtų gauta vienoda jų konsistencija.





Tiriant cemento smulkumo poveikį kietėjančių skiedinių džiuostamajam traukumui, buvo suformuota skiedinių sudėtis, pateikta 2.16 lentelėje.

**2.16 lentelė.** Skiedinių su skirtingo smulkumo cementu sudėtis, 1 m<sup>3</sup>

**Table 2.16.** Composition of mortars with a cement of different fineness, 1 m<sup>3</sup>

Skiedinio žymuo	CIRsk	CINsk	CINSR3sk	CIASNsk	CIALLNsk
Cemento tipas	CIR	CIN	CINSR3	CIASN	CIALLN
Cementas C, kg	338				
Vanduo V, l	178				
Smėlis Sm, kg	1849				
MAP X, %	0,8				
V/C	0,53				

Formuojant sudėtį (2.16 lentelė) naudotas skirtingo tipo cementas: portlandcementis CEM I 42,5 R (CIR), CEM I 42,5 N (CIN) ir CEM I 42,5 N SR3 (CINSR3) ir sudėtinis portlandcementis CEM II/A-S 42,5 N (CIASN) ir CEM II/A-LL 42,5 N (CIALLN). Pažymėtina, kad sudėtinio šlakinio (CIASN) ar klinties (CIALLN) portlandcemenčio klinkerio dalis (17 %) yra pakeista atitinkamai granuliuotu aukštakrosnių šlaku ir klintimis, o CINSR3 turi mažiau C<sub>3</sub>A.

## 2.3. Mišinių ruošimas ir bandinių formavimas

Cementiniams mišiniams (tešlai ir skiediniui) ruošti naudotos sausos medžiagos. Cementas, mineraliniai priedai, užpildai dozuoti pagal masę, o cheminės įmaišos ir vanduo – pagal tūrį.

Formuojant mišinių sudėtį ir cheminės įmaišos, ir mineraliniai priedai (cemento pakaitos) skaičiuoti procentais nuo cemento masės. Pažymėtina, kad vertinant skirtingas cheminių įmaišų veikliųjų medžiagų koncentracijas (2.8 lentelė), mišinių vandens kiekiai buvo koreguoti taip, kad būtų išlaikytas pastovus V/C ar V/K santykis. Mišiniai buvo maišyti esant 20±0,5 °C temperatūrai.

Cementinė tešla ruošta ir maišyta dviem etapais rankiniu maišytuvu 5 min. Pirmojo etapo metu į sudrėkintą indą supiltas cementas be mineralinių priedų arba su priedais ir ¾ reikiamo tešlai paruošti vandens maišomi 2 min pirmu greičiu (140±5 aps./min). Antrojo metu supilamas likęs vanduo be cheminių įmaišų arba su įmaišomis. Tada tešla maišoma 3 min antru greičiu (285±10 aps./min). Tešla ruošta siekiant įvertinti cemento dalelių koncentracijos tešloje (arba tešlos

V/C) ir cheminių įmaišų bei mineralinių priedų poveikį portlandcemenčio tešlos reologinėms savybėms.

Smulkiagrūdžiai ir stambiagrūdžiai cementiniai mišiniai (skiediniai ir skiediniai su stambiuoju užpildu) buvo ruošti laboratorine priverstinio maišymo maišyklė „Automix“ 6 min trimis etapais. Pirmojo etapo metu į sudrėkintą maišyklę supiltas cementas ir užpildas (smėlis ar smėlis ir granito skalda) buvo maišomi 1 min pirmu greičiu ( $140 \pm 5$  aps./min). Antrojo etapo metu supilta  $\frac{3}{4}$  reikiamo šviežiam mišiniui paruošti vandens, mišinys buvo maišomas 2 min pirmu greičiu. O trečiojo – supiltas likęs vanduo be arba su cheminėmis įmaišomis. Tada mišinys buvo maišomas 3 min antru greičiu ( $285 \pm 10$  aps./min).

Technologinės smulkiagrūdžių ir stambiagrūdžių cementinių mišinių savybės nustatytos bandymais pagal Lietuvos standartus: sklidumas – LST EN 1015-3:2002, mišinio tankis – LST EN 1015-6:2002 ir įtraukto oro kiekis mišinyje – LST EN 1015-7:2002.

Nustačius smulkiagrūdžių ir stambiagrūdžių cementinių mišinių technologines savybes buvo suformuotos jų sijelės (prizmelės) ( $40 \times 40 \times 160$  mm) džiūstamojo traukumo deformacijoms nustatyti. Buvo suformuota po 3 kiekvienos sudėties bandinius. Jie formose buvo tankinami vibruojant ant vibracinės aikštelės  $30 \pm 5$  s. Polietileno plėvele uždengtose formose visi bandiniai buvo kietinami 24 val., esant  $20 \pm 2$  °C aplinkos temperatūrai. Išformuoti bandiniai sandėliuoti esant vidutinei  $20 \pm 2$  °C temperatūrai ir  $40 \pm 5$  % santykinei oro drėgmei. Pažymėtina, kad bandiniai su orą įtraukiančia įmaiša prieš sandėliavimą papildomai kietinti polietileno plėvelėje 2 paras, esant  $20 \pm 2$  °C aplinkos temperatūrai. Bandiniai su traukumą mažinančia įmaiša, kaip ir bandiniai su skirtingu vandens poreikiu ar cementinės tešlos kiekiu, papildomai kietinti 6 paras.

## 2.4. Tyrimų metodika

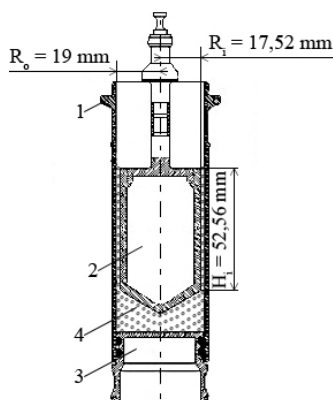
### 2.4.1. Mišinių reologinių savybių nustatymas

Cementinės tešlos reologinės savybės ištirtos rotaciniu reometru „Rheotest RN4.1“ su bendraašiais cilindrais, kurių matavimo sistemos schema pateikta 2.3 paveiksle.

2.3 paveiksle matyti, kad bendraašių cilindų matavimo sistema sudaryta iš išorinio cilindro (1) su tešlą (4) laikančia atrama (3) ir vidiniu besisukančiu cilindru (2). Tarpas tarp išorinio ir vidinio cilindro – 1,48 mm, o jų spindulių santykis ( $R_o/R_i$ ) – 1,085.

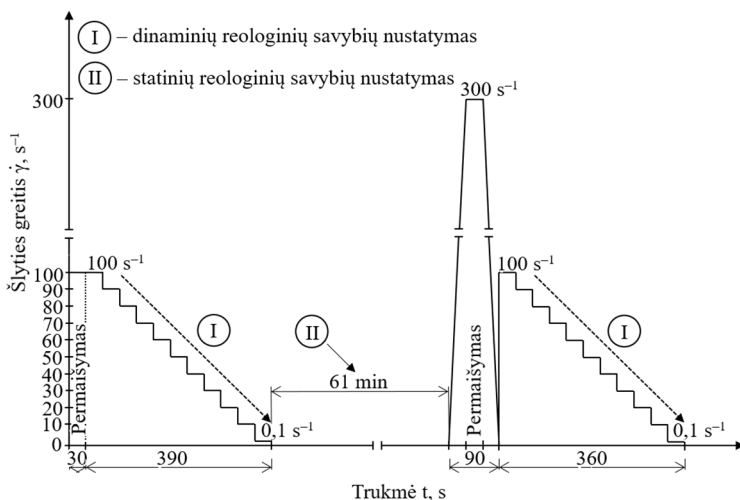
Tyrimo metu paruošta cementinė tešla ( $35 \pm 5$  ml) patalpinta į išorinį cilindrą (1), kuris standžiai įtvirtintas reometro stovė. Išoriniame cilindre su tešla (4) sukasi vidinis cilindras (2). Dėl tešlos (4) sluoksnių vidinės trinties tarp besisukan-

čio vidinio cilindro (2) (sujungto su matavimo skale) ir standžiai įtvirtinto išorinio cilindro (1), pasisukus vidiniam cilindrai (2), fiksuojama pasipriešinimo jėga ir užrašomi matavimo skalės duomenys. Tyrimo metu palaikoma  $20 \pm 2$  °C patalpos oro temperatūra, o tešlos –  $20 \pm 1$  °C.



**2.3 pav.** Rotacinio reometro „Rheotest RN4.1“ bendraašių cilindrų matavimo sistemos schema

**Fig. 2.3.** Principle scheme of coaxial cylinder measuring system of rotary rheometer Rheotest RN4.1



**2.4 pav.** Rotacinio reometro „Rheotest RN4.1“ su bendraašiais cilindrais šlyties įtempių ir šlyties greičio pokyčių matavimo režimas

**Fig. 2.4.** Rotational rheometer Rheotest RN4.1 with coaxial cylinders mode for measurement of shear stresses and shear rates changes

Cementinės tešlos (dinaminiai) ribiniai šlyties įtempiai, statiniai ribiniai šlyties įtempiai, plastinė klampa nustatyti rotaciniu reometru „Rheotest RN4.1“ su bendraašiais cilindrais pagal 2.4 paveiksle pateiktą parinkto šlyties įtempio ir šlyties greičio pokyčių matavimo režimą.

Matavimo režimą sudarė tešlos dinaminių (ribinių šlyties įtempio ir plastinės klamos) bei statinių (statinių ribinių šlyties įtempio) reologinių savybių nustatymas.

Siekiant nustatyti tešlos tiksotropiškumą, įvertinus jos negrįžtamus struktūrinius pokyčius, dinaminės reologinės savybės nustatytos prieš nustatant statines reologines savybes ir jas nustačius. Pažymėtina, kad prieš kiekvieną dinaminių reologinių savybių nustatymą tešla buvo permaišyta ir jos struktūra suardyta santykinai dideliu šlyties greičio ciklu.

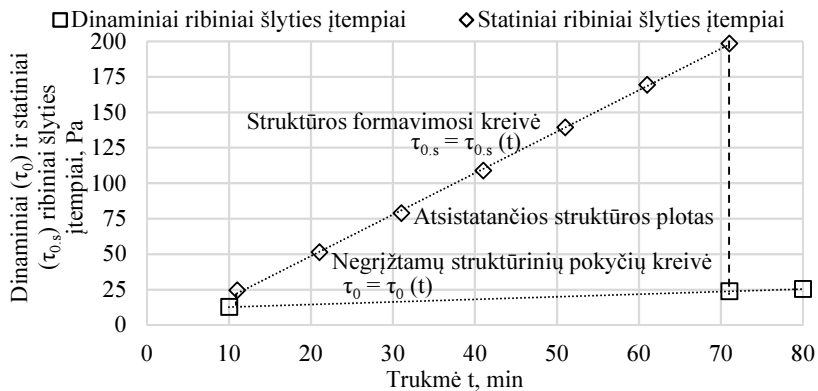
#### **2.4.2. Mišinių struktūros atstatymo parametrų ir tiksotropiškumo nustatymas**

Siekiant nustatyti tešlos dinamines reologines savybes, praėjus 10 ir 80 min nuo jų maišymo pradžios, gautos tekėjimo kreivės. Didinant šlyties greitį nuo 10 iki  $40 \text{ s}^{-1}$  ir gautoms tekėjimo kreivėms taikant Binghamo reologinį modelį, nustatyti tešlos ribiniai šlyties įtempiai ( $\tau_0$ ) ir plastinė klampa ( $\mu_{pl}$ ). Ribiniai šlyties įtempiai ( $\tau_0$ ) ir plastinė klampa ( $\mu_{pl}$ ) apskaičiuoti pagal (1.4) formulę.

Išlaikant tešlą ramybės būsenos 60 min, nustatytos statinės reologinės savybės (statiniai ribiniai šlyties įtempiai). Pažymėtina, kad vertinant tešlos pradinę struktūrą nustatytas kontrolinis statinis ribinis šlyties įtempis, išlaikius ją ramybės būsenos 1 min.

Reometro matavimo režimas statinėms reologinėms savybėms nustatyti parinktas taip, kad tešlą veikiantys šlyties įtempiai didėtų  $3,33 \text{ Pa/s}$  greičiu iki 300 Pa arba kol šlyties greičio reikšmė taps didesnė nei  $0,2 \text{ s}^{-1}$ . Šis kriterijus įtrauktas, kad būtų mažesnė tešlos deformacija ir struktūros suardymas. Pasiekus nustatytą leistiną ribą, reometras sustabdytas ir tešla palikta ramybės būsenos 10 min. Matavimas pakartotas 6 kartus kas 10 min, kol tešla išbuvo ramybės būsenos 60 min.

Išlaikius tešlą ramybės būsenos 61 min ir įvertinus jos negrįžtamus struktūrinius pokyčius (dinaminių ribinių šlyties įtempio pokytį), nustatytas struktūros atsistatymo rodiklis. Jis tešlos tiksotropiškumui įvertinti yra išreikštas atsistatantčiu struktūros plotu tarp dviejų kreivių – statinių ir dinaminių ribinių šlyties įtempio (2.5 pav.).



**2.5 pav.** Dinaminių ir statinių ribinių šlyties įtempių priklausomybė nuo cementinės teslos išlaikymo ramybės būsenos trukmės

**Fig. 2.5.** Dependence of dynamic and static yield stresses on the duration of cement paste keeping at rest

Cementinės teslos struktūros atsistatymo rodiklis apskaičiuojamas pagal (2.1) formulę:

$$S = \int_{t_0}^{t_i} (\tau_{0.s}(t) - \tau_0(t)) dt, \quad (2.1)$$

čia  $S$  – struktūros atsistatymo rodiklis, Pa·min;  $\tau_{0.s}$  – statiniai ribiniai šlyties įtempiai, Pa;  $\tau_0$  – dinaminiai ribiniai šlyties įtempiai, Pa;  $t$  – laiko trukmė, min.

### 2.4.3. Mišinių džiūstamojo traukumo deformacijų nustatymas

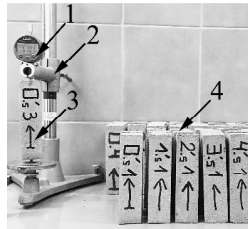
Smulkiagrūdžių (skiedinių) ir stambiagrūdžių (skiedinių su granito skalda) cementinių mišinių džiūstamojo traukumo deformacijos buvo matuojamos nuo antros kietėjimo paros iki 6 mėnesių. Tyrimo metu buvo palaikoma patalpos oro temperatūra  $20 \pm 2$  °C, o santykinė drėgmė –  $40 \pm 5$  %.

Kai yra skirtinga kietėjimo trukmė, smulkiagrūdžio ar stambiagrūdžio cementinio mišinio džiūstamasis traukumas apskaičiuojamas pagal (2.2) formulę:

$$Sh_i = \frac{l_0 - l_i}{l_0} \cdot 10^3, \quad (2.2)$$

čia  $Sh_i$  – cementinio mišinio džiūstamasis traukumas po  $i$ -osios kietėjimo paros, mm/m;  $l_0$  – pradinis bandinio ilgis po 1-osios kietėjimo paros, mm;  $l_i$  – bandinio ilgis po  $i$ -osios kietėjimo paros, mm.

Skiedinių ir skiedinių su stambiuoju užpildu (granito skalda) džiūstamojo traukumo deformacijoms nustatyti naudotas įrenginys su 0,001 mm tikslumo skaitmeniniu indikatoriumi (mikrometru) (2.6 pav.).



**2.6 pav.** Cementinių mišinių džiūstamojo traukumo deformacijų nustatymo įrenginys: 1 – skaitmeninis indikatorius (mikrometras); 2 – įrenginio stovas su rėmeliu bandiniui įstatyti; 3 – bandinys; 4 – bandinių laikymo vieta

**Fig. 2.6.** Equipment for testing of drying shrinkage deformations of cement mixtures: 1 – digital indicator (micrometer); 2 – equipment stand with frame for specimen; 3 – specimen; 4 – place of specimens storage

Mikrometras (1) standžiai įtvirtintas rėme (2), į kuri įstatytos prizmelės (3). Bandinio galuose įlietos įdėtinės detalės, į kurias įstatytos rėmo ir indikatoriaus ašelės. Kiekvienos sudėties (2.12–2.16 lentelės) džiūstamojo traukumo reikšmė buvo gauta apskaičiavus vidutinę trijų jos bandinių traukumo reikšmę.

## 2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. Cheminės įmaišos (orą įtraukiančios įmaišos, rišimosi lėtikliai ir greitikliai, klampą modifikuojančios ir traukumą mažinančios įmaišos) ir mineraliniai priedai (granuliuotasis aukštakrosnių šlakas, lakieji pelenai ir silicio dioksido ( $\text{SiO}_2$ ) mikrodulkės) skirtingai veikia cementinės tešlos ir mišinių reologines savybes ir jų plastifikavimo efektyvumą.
2. Atliekant technologines operacijas su skiediniais ir betono mišiniais turi būti vertinamos mišinių tiek statinės, tiek dinaminės reologinės charakteristikos – statiniai ribiniai šlyties įtempiai ir dinaminiai ribiniai šlyties įtempiai.
3. Cheminių įmaišų ir mineralinių priedų poveikio cementinės tešlos ir mišinių reologinėms savybėms ir struktūros atstatomumo rodikliui tirti naudotinas šiam tyrimui parinktas specialus rotacinio reometro šlyties greičio (nuo 0 iki  $100 \text{ s}^{-1}$ ) ir šlyties įtempių (nuo 0 iki  $300 \text{ Pa}$ ) pokyčių režimas.
4. Cheminių įmaišų ir mineralinių priedų įtaką cementinių mišinių džiūstamojo traukumo deformacijoms galima vertinti pagal šių įmaišų ir priedų poveikį mišinių vandens poreikiui arba jų plastifikavimo efektyvumą.

---

## **Plastifikavimo efektyvumo poveikis cementinių mišinių džiūstamojo traukumo deformacijoms**

Šių tyrimų tikslas – ištirti įvairių cheminių įmaišų ir mineralinių priedų, kurie plačiai naudojami, poveikį: portlandcemenčio tešlų reologinėms savybėms ir tiksotropiškumui, cementinių skiedinių džiūstamojo traukumo deformacijoms kietėjimo metu. Ištirti vandens kiekio, tešlos kiekio bei oro kiekio poveikį cementinių skiedinių džiūstamojo traukumo deformacijoms. Įvertinti cheminių įmaišų ir mineralinių priedų poveikį projektinių technologinių savybių cementinių mišinių džiūstamajam traukumui kietėjimo metu.

Šio skyriaus medžiaga paskelbta šešiuose straipsniuose (Macijauskas ir Gailius, 2013; Skripkiūnas *et al.*, 2016; Macijauskas ir Skripkiūnas, 2017; Macijauskas ir Girskas, 2017; Macijauskas ir Skripkiūnas, 2018; Skripkiūnas *et al.*, 2018) ir pristatyta penkiose mokslinėse konferencijose.

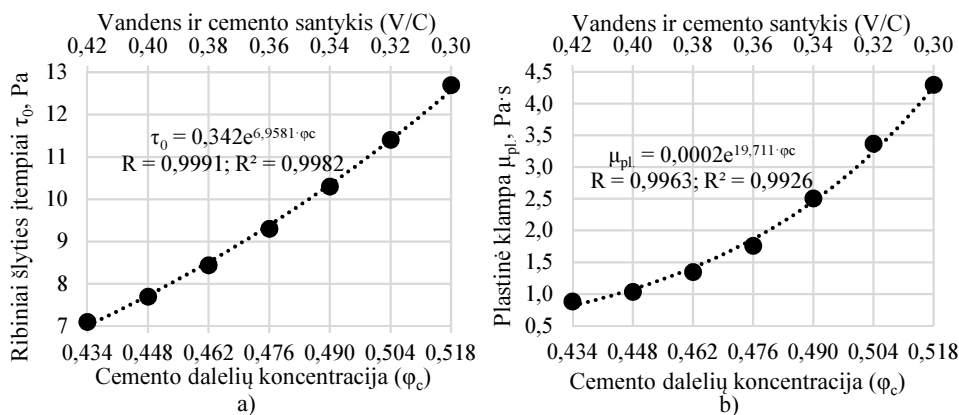
### 3.1. Cemento dalelių koncentracijos tešloje poveikis portlandcemenčio tešlų reologinėms savybėms

#### 3.1.1. Portlandcemenčio tešlų tekėjimo savybės

Cementinių tešlų tekėjimo savybes apibūdina gautos tešlų tekėjimo kreivės, matuojant rotaciniu reometru. Iš gautų tekėjimo kreivių (A priedo A1 pav.) matoma, kad nuo tešlų maišymo pradžios praėjus 10 min portlandcemenčio tešlų tekamumas priklauso nuo cemento dalelių koncentracijos ( $\varphi_c$ ) tešloje. Didinant  $\varphi_c$  kiekį tešloje nuo 0,434 iki 0,518 ir padidėjus šlyties greičiui iki  $40 \text{ s}^{-1}$ , mažėja portlandcemenčio tešlų tekamumas – šlyties įtempiai didėja nuo 42,3 iki 182,6 Pa.

#### 3.1.2. Portlandcemenčio tešlų ribiniai šlyties įtempiai ir plastinė klampa

Pritaikius Binghamo reologinį modelį gautoms portlandcemenčio tešlų tekėjimo kreivėms, gauta eksponentinė priklausomybė tarp skirtingos cemento dalelių koncentracijos tešloje ir portlandcemenčio tešlų ribinių šlyties įtempių (3.1 pav. a) bei plastinės klamos (3.1 pav. b), praėjus 10 min nuo tešlų maišymo pradžios.



**3.1 pav.** Portlandcemenčio tešlų reologinių savybių priklausomybė nuo skirtingos cemento dalelių koncentracijos tešloje praėjus 10 min nuo tešlų maišymo pradžios:

a) – ribinių šlyties įtempių; b) – plastinės klamos

**Fig. 3.1.** Dependence of the rheological properties of Portland cement pastes on different concentrations of cement particles in the paste, 10 min after the start of paste mixing:

a) – of the yield stresses; b) – of the plastic viscosity

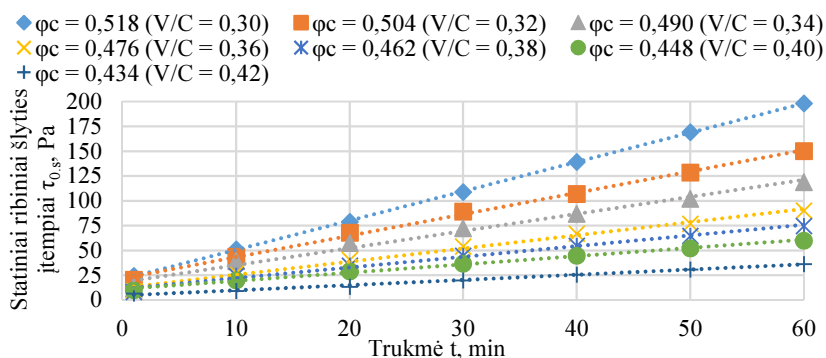


3.1 paveiksle matoma, kad didinant  $\varphi_c$  kiekį tešloje nuo 0,434 iki 0,518, keičiasi portlandcemenčio tešlų reologinės savybės: didėja ribiniai šlyties įtempiai nuo 7,1 iki 12,7 Pa bei plastinė klampa – nuo 0,88 iki 4,30 Pa·s. Tai paaiškinama tuo, kad padidėjus  $\varphi_c$  kiekiui portlandcemenčio tešloje, sumažėja laisvojo vandens kiekis, kartu ir atstumai tarp cemento dalelių, dėl kurių padidėja tarp dalelių veikiančių traukos jėgų dydis.

### 3.1.3. Portlandcemenčio tešlų statiniai ribiniai šlyties įtempiai

Esant skirtingiems cemento dalelių koncentracijos kiekiams tešlose ( $\varphi_c = 0,434$ – $0,518$ ), gauta tiesinė priklausomybė (3.2 pav.) tarp portlandcemenčio tešlų statinių ribinių šlyties įtempių ( $\tau_{0,s}$ ) ir tešlų išlaikymo ramybės būsenos trukmė.

3.2 paveiksle matoma, kad didinant  $\varphi_c$  kiekį tešlose nuo 0,434 iki 0,518, portlandcemenčio tešlų statiniai ribiniai šlyties įtempiai didėja nuo 36,5 iki 198,4 Pa, išlaikius tešlas ramybės būsenos 61 min.



3.2 pav. Portlandcemenčio tešlų statinių ribinių šlyties įtempių priklausomybė nuo tešlų išlaikymo ramybės būsenos trukmės

Fig. 3.2. Dependence of static yield stresses of Portland cement pastes on the duration of paste keeping at rest

Nustatyta, kad portlandcemenčio tešlos pradinės struktūros plastinis stiprumas ir jo didėjimo intensyvumas (statinių ribinių šlyties įtempių didėjimas) priklauso nuo  $\varphi_c$  kiekio tešloje (3.2 pav.). Kaip buvo minėta aukščiau, didinant  $\varphi_c$  kiekį tešloje, mažėja laisvojo vandens kiekis, kartu ir atstumai tarp cemento dalelių. Pažymėtina, kad ilgėjant cemento hidratacijos trukmei, laisvojo vandens kiekis tešloje taip pat mažėja, nes dalis vandens kiekio yra sunaudojama naujų hidratacijos produktų susidarymui. Dėl šių priežasčių, esant didesniai  $\varphi_c$  kiekiui tešloje ir išlaikant ją ramybės būsenos tam tikrą laiką, greičiau didėja tarp dalelių veikiančių traukos jėgų dydis ir susidarančių ryšių skaičius, kurie lemia intensy-

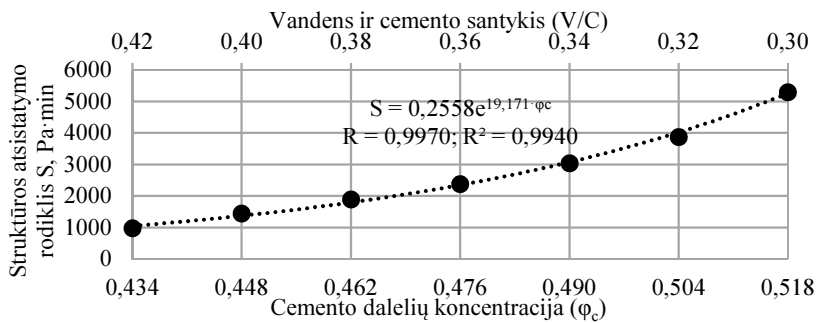
vesnį portlandcemenčio tešlos struktūros plastinio stiprumo didėjimą nei tešlos su mažesniu cemento dalelių koncentracijos kiekiu.

3.2 paveiksle matoma, kad didinant  $\varphi_c$  kiekį tešloje nuo 0,434 iki 0,518, stiprėja pradinė portlandcemenčio tešlos struktūra nuo 4,6 iki 21,1 Pa ir išlaikant tešlą ramybės būsenos 61 min pastebimas intensyvus jos plastinio stiprumo didėjimas nuo 0,52 iki 2,95 Pa/min.

Dėl cemento hydratacijos reakcijų vyksta negrįžtamas portlandcemenčio tešlos struktūrinis pokytis, kurį apibūdina ribinių šlyties įtempių ( $\tau_0$ ) padidėjimas laike. Pažymėtina, kad portlandcemenčio tešlų ribiniai šlyties įtempiai praėjus 80 min nuo tešlų maišymo pradžios padidėjo nežymiai, palyginti su tešlų ribiniais šlyties įtempiais po 10 min. Taikant tiesės lygtį, apskaičiuotiems tešlų ribiniams šlyties įtempiams po 10 ir 80 min nuo jų maišymo pradžios nustatyta: didinant  $\varphi_c$  kiekį tešloje nuo 0,434 iki 0,518 didėja negrįžtamas tešlos struktūrinis pokytis nuo 0,007 iki 0,017 Pa/min.

### 3.1.4. Portlandcemenčio tešlų tiksotropiškumas

Išlaikius tešlą ramybės būsenos 61 min, gautas negrįžtamas struktūrinis pokytis (tekamumo sumažėjimas) buvo atskirtas nuo susidariusios portlandcemenčio tešlos struktūros pagal (2.1) lygtį. Nustatyta eksponentinė priklausomybė tarp skirtingo  $\varphi_c$  kiekio tešloje ir portlandcemenčio tešlos struktūros atsistatymo rodiklio (3.3 pav.).



3.3 pav. Portlandcemenčio tešlos struktūros atsistatymo rodiklio priklausomybė nuo skirtingo cemento dalelių koncentracijos kiekio tešloje

Fig. 3.3. Dependence of the index of reversible structure of Portland cement paste on the different concentration of cement particles in the paste

3.3 paveiksle matoma, kad didinant  $\varphi_c$  kiekį tešloje nuo 0,434 iki 0,518, portlandcemenčio tešlos struktūros atsistatymo rodiklis, skirtas tešlos tiksotropiškumui įvertinti, didėja nuo 977 iki 5291 Pa·min. Tai gali būti paaiškinama

tu, kad išlaikant tešlą ramybės būsenos tam tikrą laiką susiformuoja tešlos vidinė (erdvinė) struktūra, dėl joje vykstančios cemento dalelių flokuliacijos, kurios dydis priklauso nuo tarp dalelių veikiančių Van der Valso traukos jėgų dydžio ir Brauno dalelių judėjimo. Kadangi didinant cemento dalelių koncentraciją tešloje tarp jų sumažėja atstumai ir padidėja veikiančių jėgų dydis (kartu ir dalelių flokuliacija), todėl stebimas tešlos tiksotropiškumo didėjimas.

## **3.2. Cheminėmis įmaišomis ir mineraliniais priedais modifikuotų portlandcemenčio tešlų reologinės savybės**

### **3.2.1. Modifikuotų portlandcemenčio tešlų tekėjimo savybės**

Ištirtas plačiausiai betono pramonėje naudojamo plastiklio modifikuotų lignosulfonatų pagrindu (LS) ir superplastiklių polikarboksilato esterių (PCE) bei modifikuotų akrilo polimerų (MAP) pagrindu poveikis portlandcemenčio tešlų tekėjimo savybėms (B priedo B1–B2 pav.). Pažymėtina, kad plastikliu (LS) modifikuotų tešlų V/C santykis – 0,32, o superplastikliu (PCE ir MAP) – 0,30.

Iš gautų tekėjimo kreivių (B priedo B1–B2 pav.) matoma, kad portlandcemenčio tešlų tekamumas priklauso nuo plastifikuojančios cheminės įmaišos tipo, jos veikliosios medžiagos bei kiekio praėjus 10 min nuo tešlų maišymo pradžios.

B priedo B1–B2 paveiksluose matoma, kad didinant plastifikuojančios cheminės įmaišos kiekį nuo 0 iki 0,8 % cemento masės, didėja portlandcemenčio tešlų tekamumas. Toliau didinant įmaišos kiekį nuo 0,8 iki 1,2 %, tešlų tekamumas didėja nežymiai.

Nustatyta, kad superplastiklis polikarboksilato esterių pagrindu (PCE) geriau didina tešlų tekamumą nei plastiklis modifikuotų lignosulfonatų pagrindu (LS) ir superplastiklis modifikuotų akrilo polimerų pagrindu (MAP). Didinant plastifikuojančios cheminės įmaišos kiekį nuo 0 iki 0,8 % cemento masės ir padidėjus šlyties greičiui iki  $40 \text{ s}^{-1}$ , mažėja portlandcemenčio tešlos šlyties įtempiai: nuo 142,8 iki 98,7 Pa, kai tešla modifikuota plastikliu (LS); nuo 193,4 iki 50,0 Pa, kai superplastikliu; nuo 193,4 iki 71,4 Pa, kai superplastikliu.

Žinoma, kad orą įtraukianti įmaiša (AEA) skatina mažų oro burbulų susidarymą ir yra naudojama padidinti cementinio akmens atsparumą šalčiui. Pažymėtina, kad AEA gaminama paviršių aktyvinančių medžiagų (PAM) pagrindu, todėl ji padidina ir cementinių mišinių klijumą, esant pastovioms kitoms mišinio sudedamosioms, arba sumažina vandens poreikį, reikalingą tos pačios konsistencijos mišiniui paruošti. Todėl buvo ištirtas AEA poveikis portlandcemenčio tešlų reologinėms savybėms.

Iš gautų tekėjimo kreivių (B priedo B3 pav.) matoma, kad nuo tešlų maišymo pradžios praėjus 10 min modifikuotų portlandcemenčio tešlų tekamumas priklauso nuo AEA kiekio. Didinant AEA kiekį nuo 0 iki 0,1 % cemento masės ir padidėjus šlyties greičiui iki  $40 \text{ s}^{-1}$ , didėja modifikuotų portlandcemenčio tešlų tekamumas: mažėja šlyties įtempiai nuo 133,3 iki 91,4 Pa. Toliau didinant įmaišos kiekį nuo 0,1 iki 0,2 %, tešlų tekamumas didėja nežymiai.

Ištirtas rišimosi lėtiklio natrio gliukonato pagrindu (SG) ir greitiklio kalcio nitrato pagrindu (CN) poveikis portlandcemenčio tešlų tekėjimo savybėms. Pažymėtina, kad SG ir CN modifikuotų portlandcemenčio tešlų V/C santykis – 0,32.

Iš gautų tekėjimo kreivių (B priedo B4 pav. a) matoma, kad modifikuotų portlandcemenčio tešlų tekamumas priklauso nuo rišimosi lėtiklio kiekio praėjus 10 min nuo tešlų maišymo pradžios. B priedo B4 a paveiksle matoma, kad didinant SG kiekį nuo 0 iki 0,6 % cemento masės ir padidėjus šlyties greičiui iki  $40 \text{ s}^{-1}$ , didėja modifikuotų portlandcemenčio tešlų tekamumas: mažėja šlyties įtempiai nuo 144,0 iki 123,8 Pa. Toliau didinant SG kiekį nuo 0,6 iki 1,2 %, tešlų tekamumas didėja nežymiai: šlyties įtempiai mažėja nuo 123,8 iki 117,0 Pa.

B priedo B4 b paveiksle matoma, kad CN ir jo kiekis (nuo 0 iki 2,1 % cemento masės) neturi žymaus poveikio portlandcemenčio tešlų tekamumui.

Žinoma, kad dėl stabiliklyje (VMA) esančios pagrindinės jį sudarančios veikliosios medžiagos – didelės molekulinės masės sintetinių kopolimerų, kurių persipynusios grandinės suriša cementiniame mišinyje esantį vandens perteklių, užtikrinamas mišinio homogeniškumas. VMA modifikuotas mišinys pasižymi ne tik dideliu atsparumu sluoksniavimuisi, bet ir mažu vandens atsiskyrimu iš mišinio, jam esant ramybės būsenos. Todėl buvo ištirtas VMA poveikis portlandcemenčio tešlų reologinėms savybėms. Pažymėtina, kad VMA modifikuotų portlandcemenčio tešlų V/C santykis – 0,42.

Iš gautų tekėjimo kreivių (B priedo B5 pav.) matoma, kad modifikuotų portlandcemenčio tešlų tekamumas priklauso nuo klampą modifikuojančios įmaišos kiekio praėjus 10 min nuo tešlų maišymo pradžios.

B priedo B5 paveiksle matoma, kad didinant klampą modifikuojančios įmaišos kiekį nuo 0 iki 2,0 % cemento masės ir padidėjus šlyties greičiui iki  $40 \text{ s}^{-1}$ , modifikuotų portlandcemenčio tešlų tekamumas nežymiai mažėja: šlyties įtempiai didėja nuo 42,3 iki 43,1 Pa. Toliau didinant VMA kiekį nuo 2,0 iki 3,6 %, tešlų tekamumas intensyviai mažėja: šlyties įtempiai didėja nuo 43,1 iki 55,2 Pa.

Traukumą mažinanti įmaiša (SRA) mažina cementinių mišinių plastinį, savaiminį ir džiūstamąjį traukumą kietėjant mišiniams. Tai paaiškinama tuo, kad SRA mažina vandens paviršiaus įtempius cementinio akmens kapiliarinėse porose – tai lemia porų sienelėse veikiančių traukos jėgų mažėjimą. Be to, SRA gaminama polimerų pagrindu ir joje yra paviršių aktyvinančių medžiagų. Tačiau

literatūroje nėra daug duomenų apie SRA poveikį cementinių mišinių tekėjimo ir kitoms reologinėms savybėms. Pažymėtina, kad SRA veikia tik cementinėje tešloje, o jos veikimo poveikis pasireiškia visuose cementinio mišinio lygiuose (tešloje, skiedinyje ir betone). Todėl buvo ištirtas SRA poveikis portlandcemenčio tešlų reologinėms savybėms, esant pastovioms kitoms tešlų sudedamosioms ( $V/C - 0,32$ ).

Iš gautų tekėjimo kreivių (B priedo B6 pav.) matoma, kad praėjus 10 min nuo tešlų maišymo pradžios, modifikuotų portlandcemenčio tešlų tekamumas priklauso nuo SRA kiekio.

B priedo B6 paveiksle matoma, kad didinant traukumą mažinančios įmaišos kiekį nuo 0 iki 1,0 % cemento masės ir padidėjus šlyties greičiui iki  $40 \text{ s}^{-1}$ , modifikuotų portlandcemenčio tešlų tekamumas didėja nežymiai: šlyties įtempiai mažėja nuo 133,0 iki 117,1 Pa. Toliau didinant SRA kiekį nuo 1,0 iki 2,1 %, tešlų tekamumas palaipsniui didėja: šlyties įtempiai mažėja nuo 117,1 iki 91,9 Pa.

Cemento gamybos metu susidaro dideli  $\text{CO}_2$  dujų kiekiai, kurie stipriai prisideda prie aplinkos taršos: 1 t pagaminto cemento tenka apie 1 t gamybos metu susidariusių  $\text{CO}_2$  dujų. Dėl to stengiamasi cemento klinkerio dalį pakeisti įvairiais mineraliniais priedais: granuliuotu aukštakrosnių šlaku (GGBFS), lakiaisiais pelenais (FA),  $\text{SiO}_2$  mikrodulkėmis (SF) ir kt. Be to, žinoma, kad mineraliniai priedai (GGBFS, FA, SF) gerina ne tik fizikines ir mechanines cementinio akmens savybes, bet ir turi poveikį cementinių mišinių technologinėms bei reologinėms savybėms.

Ištirtas granuliuoto aukštakrosnių šlako, lakiųjų pelenų ir  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių poveikis portlandcemenčio tešlų tekėjimo savybėms naudojant juos kaip cemento pakaitas (C priedo C1–C2 pav.). Pažymėtina, kad FA ir SF modifikuotų portlandcemenčio tešlų  $V/K$  santykis – 0,30, o GGBFS – 0,32. Be to, tešlos buvo plastifikuotos skirtingu superplastiklio (MAP) kiekiu: 0,8 % cemento masės, kai tešlos modifikuotos GGBFS ir SF; 0,6 % – kai modifikuotos FA.

Iš gautų tekėjimo kreivių (C priedo C1–C2 pav.) matoma, kad modifikuotų portlandcemenčio tešlų tekamumas priklauso cemento pakaitos rūšies (granuliuoto aukštakrosnių šlako, lakiųjų pelenų,  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių) ir jo kiekio, praėjus 10 min nuo tešlų maišymo pradžios.

C priedo C1 a paveiksle matoma, kad, keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 0 iki 30 % GGBFS ir padidėjus šlyties greičiui iki  $40 \text{ s}^{-1}$ , modifikuotų portlandcemenčio tešlų tekamumas nežymiai mažėja: šlyties įtempiai didėja nuo 29,7 iki 36,5 Pa. Toliau keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 30 iki 60 % GGBFS, tešlų tekamumas tolygiai mažėja: šlyties įtempiai didėja nuo 36,5 iki 54,9 Pa.

C priedo C1 b paveiksle matoma, kad keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 0 iki 30 % FA ir padidėjus šlyties greičiui iki  $40 \text{ s}^{-1}$ , modifikuotų port-

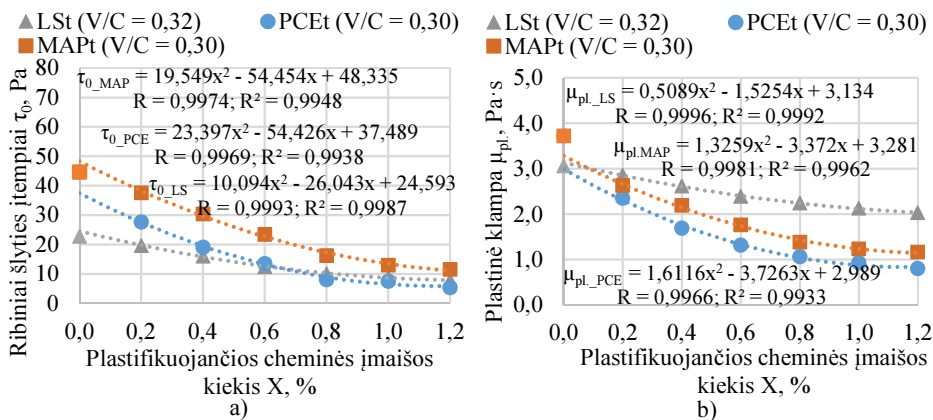
landcemenčio tešlų tekamumas tolygiai didėja: šlyties įtempiai mažėja nuo 92,9 iki 59,7 Pa. Toliau keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 30 iki 60 % FA, tešlų tekamumas nežymiai didėja: šlyties įtempiai mažėja nuo 59,7 iki 47,7 Pa. Rekomenduojamas lakiųjų pelenų optimalus kiekis – 30 %.

C priedo C2 paveiksle matoma, kad keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 0 iki 10 % SF ir padidėjus šlyties greičiui iki  $40 \text{ s}^{-1}$ , modifikuotų portlandcemenčio tešlų tekamumas mažėja: šlyties įtempiai didėja nuo 64,5 iki 100,2 Pa.

### 3.2.2. Modifikuotų portlandcemenčio tešlų ribiniai šlyties įtempiai ir plastinė klampa

Pritaikius Binghamo reologinį modelį gautoms modifikuotų portlandcemenčio tešlų tekėjimo kreivėms, nustatyta eksponentinė priklausomybė tarp skirtingų cheminių įmaišų ar mineralinių priedų kiekių ir tešlų ribinių šlyties įtempių ( $\tau_0$ ) bei plastinės klamos ( $\mu_{pl}$ ), nuo tešlų maišymo pradžios praėjus 10 min.

Ištirtas plastiklio (LS) ir superplastiklių (PCE ir MAP) poveikis portlandcemenčio tešlų ribiniams šlyties įtempiams (3.4 pav. a) bei plastinei klampai (3.4 pav. b). Nustatyta, kad modifikuotų portlandcemenčio tešlų reologinės savybės priklauso nuo plastifikuojančios cheminės įmaišos cheminės sudėties bei kiekio.



**3.4 pav.** Modifikuotų portlandcemenčio tešlų reologinių savybių priklausomybė nuo skirtingų plastifikuojančių cheminių įmaišų kiekių praėjus 10 min nuo tešlų maišymo pradžios: a) – ribinių šlyties įtempių; b) – plastinės klamos

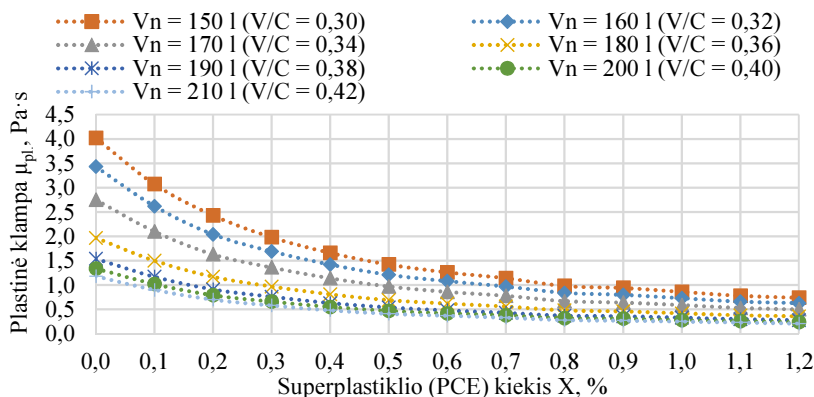
**Fig. 3.4.** Dependence of rheological properties of modified Portland cement pastes on different amounts of plasticising admixtures, 10 min after the start of paste mixing:

a) – of the yield stresses; b) – of the plastic viscosity

3.4 a paveiksle matoma, kad didinant plastifikuojančių cheminių įmaišų kiekius nuo 0 iki 0,8 % cemento masės, modifikuotų portlandcemenčio tešlų ribiniai šlyties įtempiai mažėja: nuo 22,8 iki 10,1 Pa, kai tešla modifikuota LS; nuo 44,7 iki 8,2 Pa – kai PCE; nuo 44,7 iki 16,3 Pa – kai MAP. 3.4 b paveiksle matoma, kad LS mažina tešlų plastinę klampą nuo 3,06 iki 2,24 Pa·s, PCE – nuo 3,72 iki 1,06 Pa·s bei MAP – nuo 3,72 iki 1,38 Pa·s. Tai gali būti paaiškinama tuo, kad didinant plastifikuojančios cheminės įmaišos kiekį ir didėjant cemento dalelių dispergavimo efektui, didėja atstumas tarp cemento dalelių bei mažėja tarp jų veikiančių traukos jėgų dydis ir ryšių skaičius – tai lemia mažėjančius tešlų ribinius šlyties įtempius ir plastinę klampą. Pažymėtina, kad toliau didinant įmaišų kiekius nuo 0,8 iki 1,2 %, tešlų ribiniai šlyties įtempiai ir plastinė klampa mažėja nežymiai.

Iš gautų tyrimo rezultatų (3.4 pav.) galima teigti, kad PCE efektyviau mažina modifikuotų portlandcemenčio tešlų ribinius šlyties įtempius ir plastinę klampą nei LS ir MAP. Tai gali būti paaiškinama tuo, kad LS, pagaminto modifikuotų lignosulfonatų pagrindu, veikimo principas grindžiamas elektrostatiiniu cemento dalelių atstūmimu (dispergavimu) tešloje, kai superplastiklių (PCE ir MAP), pagamintų polikarboksilato esterių bei modifikuotų akrilo polimerų pagrindu, – dar ir papildomu erdvinio atstūmimo efektu. Be to, cemento dalelių dispergavimo efekto dydis priklauso ir nuo plastifikuojančios įmaišos cheminės sudėties ir jos kiekio.

Esant skirtingam nominaliajam vandens kiekiui (arba V/C) ištirta PCE portlandcemenčio tešlų plastinė klampa (3.5 pav.).

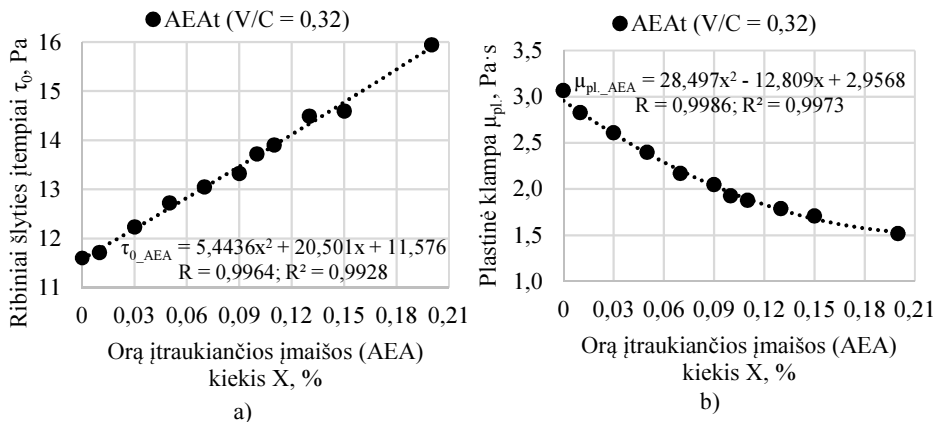


**3.5 pav.** Plastifikuotų portlandcemenčio tešlų plastinės klamos priklausomybė nuo plastifikuojančios cheminės įmaišos (PCE) kiekio, esant skirtingam nominaliajam vandens kiekiui (V/C santykiui)

**Fig. 3.5.** Dependence of the plastic viscosity of plasticised Portland cement pastes on the amount of plasticising admixture (PCE) with a different nominal water content (W/C ratio)

Nustatyta, kad didinant nominalųjį vandens (nuo 150 iki 210 l/m<sup>3</sup>) ir superplastiklio (PCE) (nuo 0 iki 1,2 % cemento masės) kiekį tešloje plastinės klampos pokytis sumažėja nuo 3,2 iki 0,93 Pa·s, o jos santykinis dydis išlieka pastovus – 0,80 (3.5 pav.). Rekomenduojamas PCE kiekis – 0,8 % nuo cemento masės.

Nustatytas AEA poveikis portlandcemenčio tešlų reologinėms savybėms – ribiniams šlyties įtempiams (3.6 pav. a) bei plastinei klampai (3.6 pav. b).



**3.6 pav.** Modifikuotų portlandcemenčio tešlų reologinių savybių priklausomybė nuo skirtingo orą įtraukiančių įmaišų (AEA) kiekio praėjus 10 min nuo tešlų maišymo pradžios: a) – ribinių šlyties įtempių; b) – plastinės klamos

**Fig. 3.6.** Dependence of rheological properties of modified Portland cement pastes on a different amount of an air entraining admixture (AEA), 10 min after the start of paste mixing: a) – of the yield stresses; b) – of the plastic viscosity

3.6 a paveiksle matoma, kad didinant AEA kiekį nuo 0 iki 0,2 % cemento masės, modifikuotų portlandcemenčio tešlų ribiniai šlyties įtempiai didėja nuo 11,6 iki 15,9 Pa. 3.6 b paveiksle matoma, kad didinant AEA kiekį nuo 0 iki 0,1 %, tešlų plastinė klampa mažėja nuo 3,07 iki 1,93 Pa·s. Toliau didinant įmaišos kiekį nuo 0,1 iki 0,2 %, tešlų plastinė klampa mažėja nežymiai – nuo 1,93 iki 1,52 Pa·s.

Pažymėtina, kad modifikuotoje portlandcemenčio tešloje įtrauktus mažus oro burbulus (įtrauktą orą) galima įsivaizduoti kaip mažo tūrio smulkias daleles (10–100 μm), kai tešla yra ramybės būsenos, bei „skysti“ (dėl oro burbulų deformavimosi), veikiant tešlą šlytimi. Didinant AEA kiekį, didėja įtraukto oro kiekis tešloje ir joje susidarantių ryšių skaičius tarp cemento dalelių ir oro burbulų – tai lemia didėjančius modifikuotos portlandcemenčio tešlos ribinius šlyties įtempius. Kartu tešlos plastinės klamos mažėjimas gali būti aiškinamas tuo, kad didėjant įtraukto oro kiekiui tešloje (didinant AEA kiekį), didėja atstumai

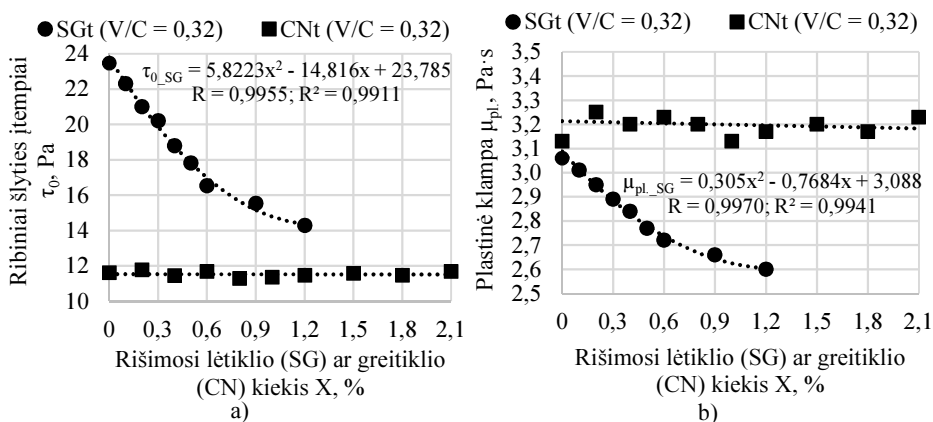


tarp cemento dalelių bei mažėja jų tarpusavio trintis ir pasipriešinimas tekėjimui (dėl oro burbulų deformavimosi) veikiant tešlą šlytimi.

Apibendrinant galima teigti, kad AEA didina ne tik portlandcemenčio tešlų tekamumą (B priedo B3 pav.), bet ir keičia jų reologines savybes (3.6 pav.): mažina plastinę klampą ir didina ribinius šlyties įtempius, kurie lemia didesnę tešlos stabilumą ir mažesnę jos sluoksniavimosi riziką, esant tešlai ramybės būsenos.

Ištirtas rišimosi lėtiklio (SG) ir greitiklio (CN) poveikis portlandcemenčio tešlų ribiniams šlyties įtempiams (3.7 pav. a) bei plastinei klampai (3.7 pav. b). Nustatyta, kad didinant SG kiekį nuo 0 iki 0,6 % cemento masės, didėja ne tik modifikuotų portlandcemenčio tešlų tekamumas (B priedo B4 pav. a), bet ir keičiasi jų reologinės savybės (3.7 pav.): mažėja ribiniai šlyties įtempiai nuo 23,5 iki 16,5 Pa bei plastinė klampa nuo 3,06 iki 2,72 Pa·s. Toliau didinant SG kiekį nuo 0,6 iki 1,2 % nežymiai mažėja tešlų ribiniai šlyties įtempiai nuo 16,5 iki 14,28 Pa bei plastinė klampa nuo 2,72 iki 2,60 Pa·s.

Nustatyta, kad CN neturi žymaus poveikio nei portlandcemenčio tešlų tekamumui (B priedo B4 pav. b), nei jų reologinėms savybėms (3.7 pav.).



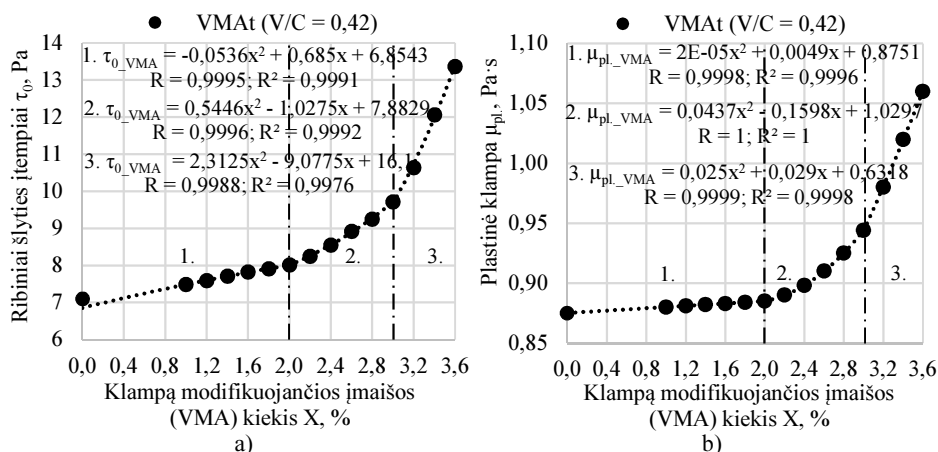
**3.7 pav.** Modifikuotų portlandcemenčio tešlų reologinių savybių priklausomybė nuo skirtingo rišimosi lėtiklio (SG) ir greitiklio (CN) kiekio praėjus 10 min nuo tešlų maišymo pradžios: a) – ribinių šlyties įtempių; b) – plastinės klamos

**Fig. 3.7.** Dependence of rheological properties of modified Portland cement pastes on a different amount of a setting retarder (SG) and a setting accelerator (CN), 10 min after the start of paste mixing: a) – of the yield stresses; b) – of the plastic viscosity

Iš gautų tyrimo rezultatų (B priedo B4 pav. ir 3.7 pav.) galima teigti, kad tik rišimosi lėtiklis pasižymi efektyviu cemento dalelių dispergavimu portlandcemenčio tešloje. Pažymėtina, kad plačiai naudojamų rišimosi lėtiklių dispergavimo efekto veikimo principas yra grindžiamas elektrostatiiniu cemento dalelių

atstūmimu bei jų papildomu erdviniu atstūmimo efektu. Todėl didinant rišimosi lėtiklio kiekį tešloje, didėja atstumai tarp cemento dalelių ir mažėja tarp jų veikiančių traukos jėgų dydis, o šių veiksmų poveikis lemia mažėjančius modifikuotos portlandcemenčio tešlos ribinius šlyties įtempius ir plastinę klampą.

Ištirtas klampą modifikuojančios įmaišos (VMA) poveikis portlandcemenčio tešlų reologinėms savybėms. Nustatyta, kad VMA (nuo 0 iki 2,0 % cemento masės) neturi didelio poveikio nei tešlų tekamumui (B priedo B5 pav.), nei jų reologinėms savybėms: nežymiai didėja modifikuotų portlandcemenčio tešlų ribiniai šlyties įtempiai – nuo 7,1 iki 8,0 Pa (3.8 pav. a), o plastinė klampa – nuo 0,87 iki 0,89 Pa·s (3.8 pav. b). Toliau didinant VMA kiekį nuo 2,0 iki 3,6 % intensyviai didėja tešlų ribiniai šlyties įtempiai – nuo 8,0 iki 13,4 Pa, o plastinė klampa – nuo 0,89 iki 1,06 Pa·s.

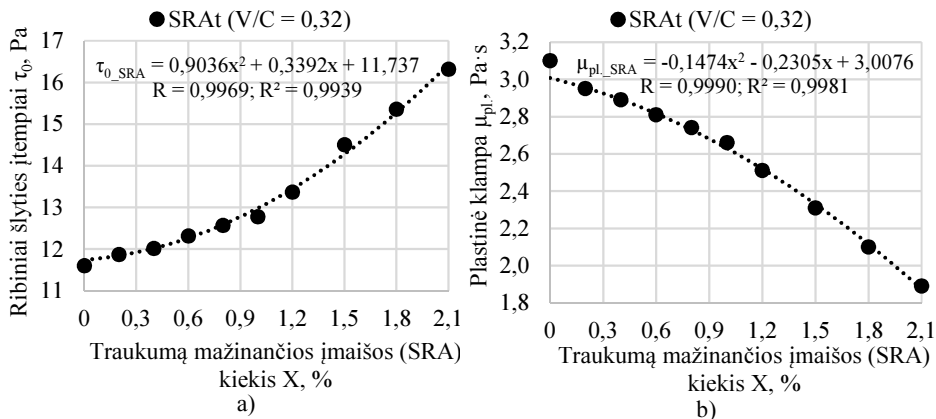


**3.8 pav.** Modifikuotų portlandcemenčio tešlų reologinių savybių priklausomybė nuo skirtingo klampą modifikuojančios įmaišos (VMA) kiekio praėjus 10 min nuo tešlų maišymo pradžios: a) – ribinių šlyties įtempių; b) – plastinės klamos

**Fig. 3.8.** Dependence of rheological properties of modified Portland cement pastes on a different amount of a viscosity modifying admixture (VMA), 10 min after the start of paste mixing: a) – of the yield stresses; b) – of the plastic viscosity

VMA esančios didelės molekulinės masės sintetinių kopolimerų grandinės adsorbuojasi ant dviejų ir daugiau cemento dalelių fiziškai laikydamos jas kartu bei sudarydamos papildomus ryšius tarp jų – tai lemia padidėjusius modifikuotos portlandcemenčio tešlos ribinius šlyties įtempius. Pažymėtina, kad stabiliklyje esantys polimerai yra hidrofiliški ir pasižymi didele geba surišti vandens molekules. Todėl didinant VMA turinę koncentraciją tešlos skystojoje fazėje ir veikiančią ją šlytimi didėja tarp dalelių trintis, tai lemia didėjančią tešlos plastinę klampą.

Nustatytas traukumą mažinančios įmaišos (SRA) poveikis portlandcemenčio tešlų ribiniams šlyties įtempiams (3.9 pav. a) ir plastinei klampai (3.9 pav. b).



**3.8 pav.** Modifikuotų portlandcemenčio tešlų reologinių savybių priklausomybė nuo skirtingo traukumą mažinančios įmaišos (SRA) kiekio praėjus 10 min nuo tešlų maišymo pradžios: a) – ribinių šlyties įtempiai; b) – plastinės klampos

**Fig. 3.8.** Dependence of rheological properties of modified Portland cement pastes on a different amount of a shrinkage reducing admixture (SRA), 10 min after the start of paste mixing: a) – of the yield stresses; b) – of the plastic viscosity

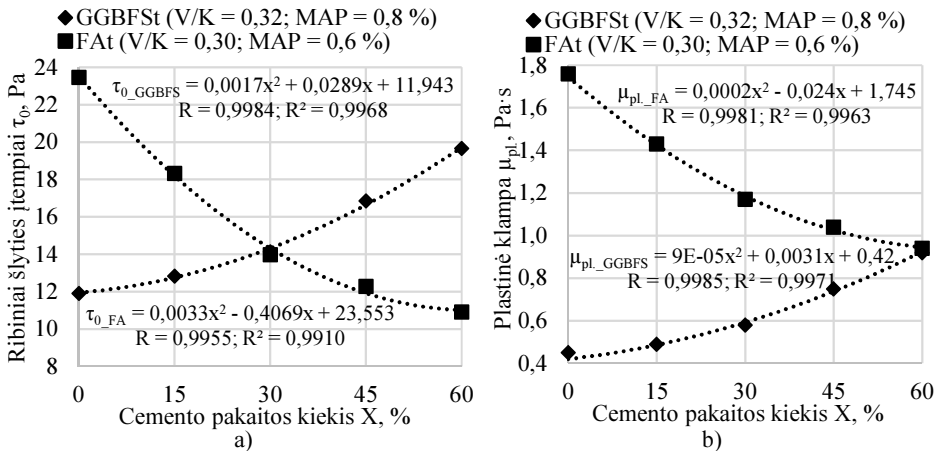
3.9 paveiksle matoma, kad didinant SRA kiekį nuo 0 iki 1,0 % cemento masės, modifikuotų portlandcemenčio tešlų reologinės savybės nežymiai kinta: ribiniai šlyties įtempiai didėja nuo 11,6 iki 12,8 Pa, o plastinė klampa mažėja nuo 3,10 iki 2,67 Pa·s. Toliau didinant įmaišos kiekį nuo 1,0 iki 2,1 %, tešlų reologinės savybės kinta tolygiai: ribiniai šlyties įtempiai didėja nuo 12,8 iki 16,3 Pa, o plastinė klampa mažėja nuo 2,67 iki 1,89 Pa·s. Tai galima paaiškinti tuo, kad traukumą mažinančioje įmaišoje esančios paviršių aktyvinančios medžiagos adsorbuojasi ant cemento dalelių. Didėjant PAM koncentracijai (didinant SRA kiekį) tešlos skystojoje fazėje, didėja tarp cemento dalelių paviršių susidarančių hidrofobinių traukos jėgų dydis, kurio poveikis lemia didėjančius tešlos ribinius šlyties įtempius. Pažymėtina, kad SRA esančios PAM mažina cemento dalelių flokuliaciją tešloje, tai lemia mažesnę cemento dalelių tarpusavio trintį ir pasipriešinimą tekėjimui. Todėl didinant SRA kiekį ir veikiant tešlą šlytimi, modifikuota portlandcemenčio tešlos plastinė klampa mažėja.

Apibendrinant galima teigti, kad didinant SRA kiekį nuo 1,0 iki 2,1 % cemento masės, palaipsniui didėja ne tik modifikuotos portlandcemenčio tešlos tekamumas (B priedo B6 pav.), bet ir jos stabilumas bei atsparumas išsisluk-

niavimui esant ramybės būsenos, kuriuos lemia tesloje didėjantys ribiniai šlyties įtempiai (3.9 pav. a).

Ištirtas lakiųjų pelenų (FA) ir granuliuoto aukštakrosnių šlako (GGBFS) poveikis portlandcemenčio teslų reologinėms savybėms – ribiniams šlyties įtempiams (3.10 pav. a) ir plastinei klampa (3.10 pav. b).

Didinant FA (cemento pakaitos) kiekį nuo 0 iki 30 %, modifikuotų portlandcemenčio teslų reologinės savybės kinta tolygiai: mažėja ribiniai šlyties įtempiai – nuo 23,5 iki 14,0 Pa, plastinė klampa – nuo 1,76 iki 1,17 Pa·s (3.10 pav.). Toliau didinant cemento pakaitos kiekį nuo 30 iki 60 %, nežymiai mažėja teslų ribiniai šlyties įtempiai – nuo 14,0 iki 10,7 Pa ir plastinė klampa – nuo 1,17 iki 0,95 Pa·s.



**3.10 pav.** Modifikuotų portlandcemenčio teslų reologinių savybių priklausomybė nuo cemento pakaitų (GGBFS ir FA) kiekių praėjus 10 min nuo teslų maišymo pradžios: a) – ribinių šlyties įtempių; b) – plastinės klamos

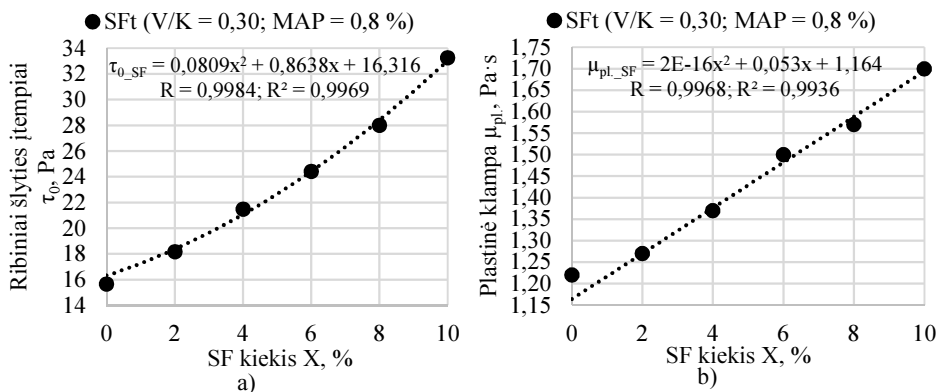
**Fig. 3.10.** Dependence of the rheological properties of modified Portland cement pastes on different amounts of cement substitutes (GGBFS and FA), 10 min after the start of paste mixing: a) – of the yield stresses; b) – of the plastic viscosity

Pažymėtina, kad FA savitasis paviršius –  $3565 \text{ cm}^2/\text{g}$  – yra mažesnis, palyginti su portlandcemenčio dalelių savituoju paviršiumi ( $4128 \text{ cm}^2/\text{g}$ ). Be to, FA vidutinis dalelės dydis ( $28,77 \mu\text{m}$ ) yra didesnis nei portlandcemenčio dalelių ( $21,26 \mu\text{m}$ ). Todėl galima daryti prielaidą, kad didinant FA kiekį ir esant pastovioms kitoms teslos sudedamosioms, didėja laisvojo vandens kiekis tesloje. Kartu didėja atstumai tarp dalelių ir mažėja tarp jų veikiančių traukos jėgų dydis – tai lemia mažėjančius modifikuotos portlandcemenčio teslos ribinius šlyties įtempius ir plastinę klampą.

3.10 paveiksle matoma, kad keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 0 iki 30 % GGBFS, modifikuotų portlandcemenčio tešlą reologinės savybės nežymiai kinta: didėja ribiniai šlyties įtempiai – nuo 11,9 iki 14,1 Pa ir plastinė klampa – nuo 0,45 iki 0,58 Pa·s. Toliau keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 30 iki 60 % GGBFS, tolygiai didėja tešlą ribiniai šlyties įtempiai – nuo 14,1 iki 19,7 Pa, o plastinė klampa – nuo 0,58 iki 0,92 Pa·s.

Pažymėtina, kad GGBFS savitasis paviršius – 1587 cm<sup>2</sup>/g – yra mažesnis ir už portlandcemenčio dalelių savitąjį paviršių (4128 cm<sup>2</sup>/g), ir už FA (3565 cm<sup>2</sup>/g). Be to, GGBFS vidutinis dalelių dydis (53,55 μm) yra žymiai didesnis nei portlandcemenčio (21,26 μm) ir FA (28,77 μm). Pažymėtina ir tai, kad daugelis tyrėjų yra nustatę, kad GGBFS dalelių paviršius yra kietesnis, o forma kampuotesnė, palyginti su portlandcemenčio ar lakiųjų pelenų, kurių dalelių forma panašesnė į sferinę. Todėl galima daryti prielaidą, kad didėjant stambiųjų ir kampuotų dalelių kiekiui (didinant GGBFS kiekį) ir esant pastovioms kitoms tešlos sudedamosioms, didėja tarp dalelių esančių kontaktinių ryšių skaičius bei trinties jėgų dydis (veikiant tešlą šlytimi) – tai lemia didėjančius modifikuotos portlandcemenčio tešlos ribinius šlyties įtempius ir plastinę klampą.

Ištyrus SF poveikį portlandcemenčio tešlą ribiniams šlyties įtempiams (3.11 pav. a) ir plastinei klampai (3.11 pav. b) nustatyta, kad, keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 0 iki 10 % SF, intensyviai didėja modifikuotų portlandcemenčio tešlą ribiniai šlyties įtempiai – nuo 15,7 iki 33,3 Pa, o plastinė klampa – nuo 1,22 iki 1,70 Pa·s.



**3.11 pav.** Modifikuotų portlandcemenčio tešlą reologinių savybių priklausomybė nuo skirtingo SiO<sub>2</sub> mikrodulkių (SF) kiekio praėjus 10 min nuo tešlą maišymo pradžios:

a) – ribinių šlyties įtempių; b) – plastinės klamos

**Fig. 3.11.** Dependence of rheological properties of modified Portland cement pastes on a different amount of a SiO<sub>2</sub> fumes (SF), 10 min after the start of paste mixing:

a) – of the yield stresses; b) – of the plastic viscosity

Pažymėtina, kad  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių savitasis paviršius ( $24\,000\text{ cm}^2/\text{g}$ ) yra daug kartų didesnis, palyginti su portlandcemenčio dalelių ( $4128\text{ cm}^2/\text{g}$ ). Todėl galima daryti prielaidą, kad didinant SF (cemento pakaitos) kiekį ir esant pastovioms kitoms teslos sudedamosioms, mažėja laisvojo vandens kiekis tesloje. Kartu mažėja atstumai tarp dalelių ir didėja tarp jų veikiančių traukos jėgų dydis – tai lemia didėjančius modifikuotų portlandcemenčio teslų ribinius šlyties įtempius bei plastinę klampą.

Apibendrinant galima teigti, kad reologinėms cementinės teslos savybėms didelį poveikį turi mineraloginė bei granulimetrinė mineralinių priedų sudėtis, jų dalelių forma, smulkumas (arba savitasis paviršius).

### **3.3. Cheminėmis įmaišomis ir mineraliniais priedais modifikuotų cementinių mišinių struktūros atstatymo parametrai ir tiksotropiškumas**

#### **3.3.1. Modifikuotų portlandcemenčio teslų statiniai ribiniai šlyties įtempiai**

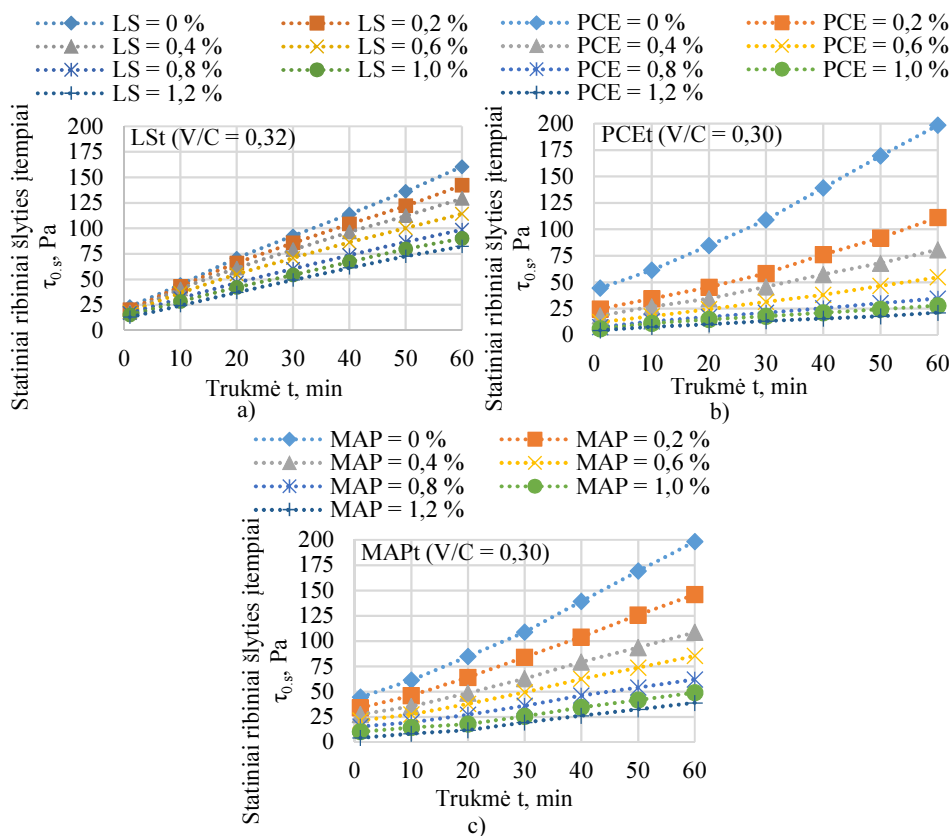
Ištirtas plastiklio (LS) ir superplastiklių (PCE ir MAP) poveikis portlandcemenčio teslų statiniams ribiniams šlyties įtempiams ( $\tau_{0,s}$ ) ir gauta jų kitimo priklausomybė nuo teslų išlaikymo ramybės būsenos trukmės (3.12 pav.).

3.12 paveiksle matoma, kad didinant plastifikuojančios cheminės įmaišos kiekį nuo 0 iki 0,8 % cemento masės, išlaikius teslas ramybės būsenos 61 min, modifikuotų portlandcemenčio teslų statiniai ribiniai šlyties įtempiai mažėja: nuo 160,5 iki 98,6 Pa, kai tesla yra modifikuota plastikliu (LS); nuo 198,4 iki 34,6 Pa – kai modifikuota superplastikliu PCE; nuo 198,4 iki 62,0 Pa – kai superplastikliu MAP. Toliau didinant įmaišos kiekį nuo 0,8 iki 1,2 %, teslų statiniai ribiniai šlyties įtempiai nežymiai mažėja: nuo 98,6 iki 82,1 Pa, kai tesla yra modifikuota plastikliu (LS); nuo 34,6 iki 21,3 Pa – kai superplastikliu PCE; nuo 62,0 iki 39,0 Pa – kai superplastikliu MAP.

Nustatyta, kad modifikuotų portlandcemenčio teslų pradinės struktūros plastinis stiprumas bei jo didėjimo intensyvumas (statinių ribinių šlyties įtempių didėjimas) priklauso nuo plastifikuojančios įmaišos cheminės sudėties ir kiekio (3.12 pav.).

3.12 paveiksle matoma, kad didinant plastifikuojančios cheminės įmaišos kiekį nuo 0 iki 1,2 % cemento masės, modifikuotų portlandcemenčio teslų pradinė struktūra silpnėja: nuo 22,4 iki 12,8 Pa, kai teslos modifikuotos plastikliu (LS); nuo 35,4 iki 4,7 Pa – kai superplastikliu PCE; nuo 35,4 iki 2,1 Pa – kai superplastikliu MAP. Kartu, išlaikant teslas ramybės būsenos 61 min, modifi-

kuotų portlandcemenčio tešlų struktūros plastinio stiprumo didėjimo intensyvumas mažėja: nuo 2,30 iki 1,18 Pa/min, kai tešlos modifikuotos plastikliu (LS); nuo 2,65 iki 0,27 Pa/min – kai superplastikliu PCE; nuo 2,65 iki 0,60 Pa/min – kai superplastikliu MAP.



**3.12 pav.** Modifikuotų skirtingais plastifikuojančios cheminės įmaišos kiekiais portlandcemenčio tešlų statinių ribinių šlyties įtempių priklausomybė nuo tešlų ramybės būsenos išlaikymo trukmės: a) su plastikliu (LS); b) su superplastikliu PCE; c) su superplastikliu MAP

**Fig. 3.12.** Dependence of the static yield stresses of Portland cement pastes modified with different amounts of plasticising admixture on the duration of paste keeping at rest: a) with a plasticiser (LS); b) with a superplasticiser PCE; c) with a superplasticiser MAP

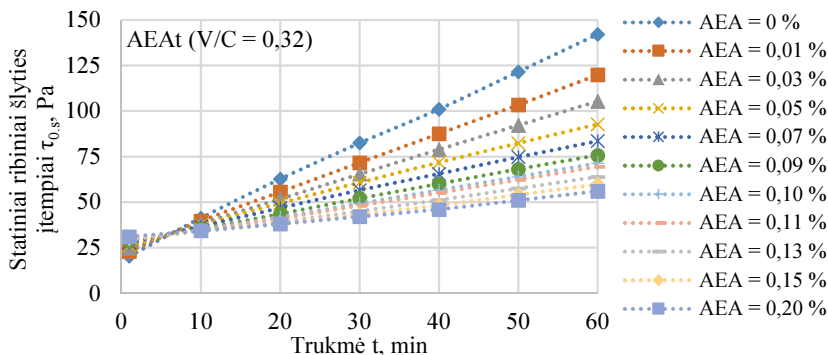
Modifikuotų portlandcemenčio tešlų pradinės struktūros plastinio stiprumo mažėjimą galima paaiškinti tuo, kad didinant plastifikuojančios cheminės įmai-

šos kiekį ir didėjant jos dispergavimo efektyvumui tešloje, didėja atstumai tarp cemento dalelių – tai lemia mažėjančią tarp jų susidarantių traukos jėgų dydį.

Pažymėtina, kad plastifikuojančios cheminės įmaišos pasižymi ne tik dispergavimo efektu, bet ir cemento hidratacijos reakcijų stabdymu (lėtinimu). Todėl galima teigti, kad išlaikant tešlą ramybės būsenos tam tikrą laiką, lėčiau didėja tarp cemento dalelių susidarantių ryšių skaičius ir tarp jų veikiančių traukos jėgų dydis. Tai lemia lėtesnį tešlos struktūros plastinio stiprumo didėjimą, palyginti su tešla be plastifikuojančios cheminės įmaišos.

Dėl cemento hidratacijos reakcijų vyksta negrįžtami modifikuotų plastifikuojančia chemine įmaiša portlandcemenčio tešlų struktūriniai pokyčiai, kuriuos apibūdina ribinių šlyties įtempių ( $\tau_0$ ) padidėjimas laike. Pritaikius tiesinę lygtį, apskaičiuotiems modifikuotų portlandcemenčio tešlos ribiniams šlyties įtempiams po 10 ir 80 min nuo tešlos maišymo pradžios, nustatyta, kad didinant plastifikuojančios cheminės įmaišos kiekį nuo 0 iki 1,2 % cemento masės, negrįžtami tešlų struktūriniai pokyčiai mažėja: nuo 0,1084 iki 0,0340 Pa/min, kai tešlos modifikuotos plastikliu (LS); nuo 0,1571 iki 0,0100 Pa/min – kai superplastikliu PCE; nuo 0,1571 iki 0,0043 Pa/min – kai superplastikliu MAP.

Nustatytas AEA poveikis portlandcemenčio tešlų statiniams ribiniams šlyties įtempiams ( $\tau_{0,s}$ ) ir gauta jų kitimo priklausomybė nuo tešlų ramybės būsenos išlaikymo trukmės (3.13 pav.).



**3.13 pav.** Modifikuotų skirtingais orą įtraukiančios įmaišos (AEA) kiekiais portlandcemenčio tešlų statinių ribinių šlyties įtempių priklausomybė nuo tešlų ramybės būsenos išlaikymo trukmės

**Fig. 3.13.** Dependence of the static yield stresses of Portland cement pastes modified with different amounts of the air entraining admixture (AEA) on the duration of paste keeping at rest

3.13 paveiksle matoma, kad didinant AEA kiekį nuo 0 iki 0,1 % cemento masės, modifikuotų portlandcemenčio tešlų statiniai ribiniai šlyties įtempiams ma-



žėja nuo 142,1 iki 71,3 Pa, išlaikius tešlas ramybės būsenos 61 min. Toliau didinant įmaišos kiekį nuo 0,1 iki 0,2 %, tešlų statiniai ribiniai šlyties įtempiai nežymiai mažėja nuo 71,3 iki 56,0 Pa.

Nustatyta, kad modifikuotų portlandcemenčio tešlų pradinės struktūros plastinis stiprumas ir jo didėjimo intensyvumas (statinių ribinių šlyties įtempių didėjimas) priklauso nuo AEA kiekio (3.13 pav.).

3.13 paveiksle matoma, kad didinant AEA kiekį nuo 0 iki 0,1 % cemento masės, modifikuotų portlandcemenčio tešlų pradinė struktūra stiprėja nuo 20,2 iki 27,9 Pa. Kartu, išlaikant tešlas ramybės būsenos 61 min, modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros plastinio stiprumo didėjimo intensyvumas mažėja nuo 2,04 iki 0,72 Pa/min. Toliau didinant įmaišos kiekį nuo 0,1 iki 0,2 %, tešlų pradinė struktūra nežymiai stiprėja nuo 27,9 iki 29,9 Pa, o jų struktūros plastinio stiprumo didėjimo intensyvumas nežymiai mažėja nuo 0,72 iki 0,42 Pa/min.

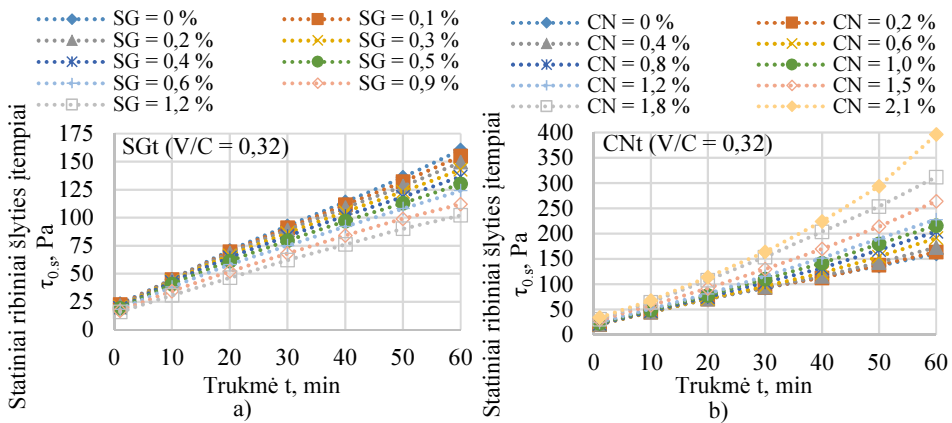
Pažymėtina, kad orą įtraukianti įmaiša gaminama paviršių aktyvinančių medžiagų pagrindu. Didėjant įtrauktų oro burbulų kiekiui (didinant AEA kiekį) tešloje, didėja atstumai tarp cemento dalelių bei tarp jų ir oro burbulų susidarančių ryšių skaičius. Tai lemia stiprėjančią tešlos pradinę struktūrą.

Kaip buvo minėta aukščiau, oro burbulus tešloje galima įsivaizduoti kaip smulkias daleles, esant tešlai ramybės būsenos, bei „skystį“ (dėl oro burbulų deformavimosi), veikiant tešlą šlytimi. Be to, pažymėtina, kad ilgėjant cemento hidratacijos trukmei, modifikuotoje portlandcemenčio tešloje tolygiai persiskirsto susidarę ir susidaro papildomi oro burbulai. Todėl galima teigti, kad didėjant oro kiekiui tešloje (didinant AEA kiekį) ir ją veikiant šlytimi, modifikuotos portlandcemenčio tešlos struktūros plastinio stiprumo didėjimo intensyvumas mažėja dėl didėjančio jos deformuojamumo.

Dėl cemento hidratacijos reakcijų vyksta negrįžtami modifikuotų orą įtraukiančia įmaiša portlandcemenčio tešlų struktūriniai pokyčiai, kuriuos apibūdina ribinių šlyties įtempių ( $\tau_0$ ) padidėjimas laike. Pritaikius tiesinę lygtį, apskaičiuotiems modifikuotų portlandcemenčio tešlų ribiniams šlyties įtempiams po 10 ir 80 min nuo tešlų maišymo pradžios, nustatyta, kad didinant AEA kiekį nuo 0 iki 0,2 % cemento masės, negrįžtami tešlų struktūriniai pokyčiai nežymiai mažėja nuo 0,0186 iki 0,0071 Pa/min.

Ištirtas rišimosi lėtiklio (SG) ir greitiklio (CN) poveikis portlandcemenčio tešlų statiniams ribiniams šlyties įtempiams ( $\tau_{0,s}$ ) ir gauta jų kitimo priklausomybė nuo tešlų ramybės būsenos išlaikymo trukmės (3.14 pav.).

3.14 a paveiksle matoma, kad didinant SG kiekį nuo 0 iki 0,6 % cemento masės, modifikuotų portlandcemenčio tešlų statiniai ribiniai šlyties įtempiai palaipsniui mažėja nuo 160,5 iki 124,0 Pa, išlaikius tešlas ramybės būsenos 61 min. Toliau didinant SG kiekį nuo 0,6 iki 1,2 %, tešlų statiniai ribiniai šlyties įtempiai nežymiai mažėja nuo 124,0 iki 102,0 Pa.



**3.14 pav.** Modifikuotų portlandcemenčio tešlų statinių ribinių šlyties įtempių priklausomybė nuo tešlų ramybės būsenos išlaikymo trukmės: a) su rišimosi lėtikliu (SG); b) su rišimosi greitikliu (CN)

**Fig. 3.14.** The dependence of static yield stresses of modified Portland cement pastes on the duration of paste keeping at rest: a) with setting retarder (SG); b) with setting accelerator (CN)

3.14 b paveiksle matoma, kad didinant CN kiekį nuo 0 iki 0,4 % cemento masės, išlaikius tešlas ramybės būsenos 61 min, modifikuotų portlandcemenčio tešlų statiniai ribiniai šlyties įtempiai nežymiai didėja nuo 160,5 iki 172,9 Pa. Toliau didinant CN kiekį nuo 0,4 iki 1,2 %, tešlų statiniai ribiniai šlyties įtempiai palaipsniui didėja nuo 172,9 iki 228 Pa, o didinant iki 2,1 % – intensyviai didėja iki 396,0 Pa.

Nustatyta, kad modifikuotų portlandcemenčio tešlų pradinės struktūros plastinis stiprumas bei jo didėjimo intensyvumas (statinių ribinių šlyties įtempių didėjimas) priklauso nuo rišimosi lėtiklio ir greitiklio kiekių (3.14 pav.).

3.14 a paveiksle matoma, kad didinant SG kiekį nuo 0 iki 0,6 % cemento masės, modifikuotų portlandcemenčio tešlų pradinę struktūrą nežymiai silpnėja nuo 22,4 iki 19,9 Pa. Kartu, išlaikant tešlas ramybės būsenos 61 min, modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros plastinio stiprumo didėjimo intensyvumas palaipsniui mažėja nuo 2,30 iki 1,77 Pa/min. Toliau didinant įmaišos kiekį nuo 0,6 iki 1,2 %, tešlų pradinę struktūrą silpnėja nuo 19,9 iki 16,1 Pa, o jų struktūros plastinio stiprumo didėjimo intensyvumas nežymiai mažėja nuo 1,77 iki 1,47 Pa/min.

Kaip buvo minėta aukščiau (žr. 3.2.2 poskyrį), rišimosi lėtiklis natrio gliukonato pagrindu (SG) yra modifikuotas ir pasižymi dispergavimo efektu. Todėl tešlų pradinės struktūros plastinio stiprumo mažėjimą galima paaiškinti tuo, kad didinant SG kiekį ir didėjant jo dispergavimo efektyvumui tešloje, didėja atstu-

mai tarp cemento dalelių – tai lemia tarp jų susidarančių traukos jėgų dydžio mažėjimą.

Žinoma, kad SG pagrindą sudarantis natrio gliukonatas adsorbuojasi ant portlandcemenčio klinkerį sudarančių mineralų (kalcio silikatų ir kalcio aluminatų paviršiaus), sudarydamas apvaskalą, kuris lėtina kalcio tirpumą iš nehidratavusių cemento dalelių. Dėl to tešloje lėtėja vykstantys hidratacijos reakcijų procesai – hidratacijos produktų formavimasis, kalcio hidrosilikatų ir etringito susidarymas. Taip pat lėtėja laisvojo vandens kiekio mažėjimas ir ilgėja jo išlaikymas tešloje. Todėl galima teigti, kad didinant SG kiekį ir išlaikant tešlą ramybės būsenos tam tikrą laiką, lėčiau didėja tarp cemento dalelių susidarančių ryšių skaičius ir tarp jų veikiančių traukos jėgų dydis. Tai lemia modifikuotos portlandcemenčio tešlos struktūros plastinio stiprumo didėjimo intensyvumo mažėjimą.

Nustatyta, kad didinant CN kiekį nuo 0 iki 0,4 % cemento masės, modifikuotų portlandcemenčio tešlų pradinės struktūros stipris nežymiai mažėja nuo 22,4 iki 18,8 Pa, o didinant iki 2,1 % – išlieka pastovus.

3.14 b paveiksle matoma, kad didinant CN kiekį nuo 0 iki 0,4 % cemento masės ir išlaikant tešlas ramybės būsenos 61 min, modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros plastinio stiprumo didėjimo intensyvumas nežymiai didėja nuo 2,30 iki 2,52 Pa/min. Toliau didinant CN kiekį nuo 0,4 iki 1,2 %, tešlų struktūros plastinio stiprumo didėjimo intensyvumas palaipsniui didėja nuo 2,52 iki 3,46 Pa/min, o didinant iki 2,1 % – intensyviai didėja iki 5,96 Pa/min.

Rišimosi greitiklis kalcio nitrato pagrindu (CN) skatina kalcio silikatų hidrataciją, silpnindamas pradinių hidratacijos produktų sudarytą apvaskalą apie cemento dalelę, bei greitina kalcio aluminatų reakciją su gipsu, kurios metu susidaro etringitas. Taip pat CN greitina susidariusio etringito transformavimą į monosulfoaluminatą. Todėl galima teigti, kad didinant rišimosi greitiklio kiekį, tešloje greitėja vykstantys hidratacijos reakcijų procesai – hidratacijos produktų formavimasis, kalcio hidrosilikatų ir etringito susidarymas. Tai lemia greitesnį laisvojo vandens kiekio mažėjimą ir trumpesnę jo išlaikymą tešloje. Pažymėtina, kad mažėjant laisvojo vandens kiekiui ir susidarant naujiems hidratacijos produktams, tešloje mažėja atstumai tarp dalelių ir didėja tarp jų esančių ryšių skaičius ir veikiančių traukos jėgų dydis. Dėl to didinant CN kiekį ir išlaikant tešlas ramybės būsenos tam tikrą laiką, modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros plastinio stiprumo didėjimas intensyvėja.

Dėl cemento hidratacijos reakcijų vyksta negrįžtami modifikuotų rišimosi lėtikliu ar greitikliu portlandcemenčio tešlų struktūriniai pokyčiai, kuriuos apibūdina ribinių šlyties įtempių ( $\tau_0$ ) padidėjimas laike. Pritaikius tiesinę lygtį, apskaičiuotiems modifikuotų portlandcemenčio tešlų ribiniams šlyties įtempiams po 10 ir 80 min nuo tešlų maišymo pradžios nustatyta: didinant SG kiekį nuo 0 iki 0,6 % cemento masės, tešlų negrįžtami struktūriniai pokyčiai ma-

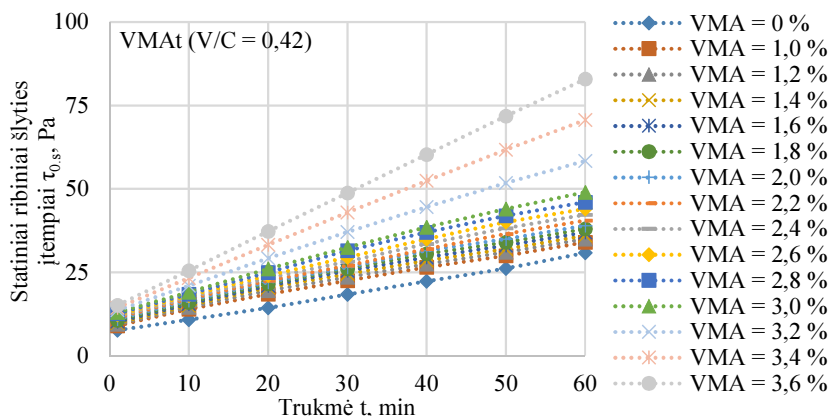
žėja nuo 0,0875 iki 0,0315 Pa/min. Toliau didinant įmaišos kiekį nuo 0,6 iki 1,2 %, tešlų negrįžtami struktūriniai pokyčiai mažėja nuo 0,0315 iki 0,0098 Pa/min (3.14 pav. a). 3.14 b paveiksle matoma, kad didinant CN kiekį nuo 0 iki 2,1 % cemento masės, tešlų negrįžtami struktūriniai pokyčiai nežymiai didėja nuo 0,0100 iki 0,0386 Pa/min.

Ištirtas klampą modifikuojančios įmaišos (VMA) poveikis portlandcemenčio tešlų statiniams ribiniams šlyties įtempiams ( $\tau_{0,s}$ ) ir gauta jų kitimo priklausomybė nuo tešlų ramybės būsenos išlaikymo trukmės (3.15 pav.).

3.15 paveiksle matoma, kad didinant VMA kiekį nuo 0 iki 1,0 % cemento masės, išlaikius tešlas ramybės būsenos 61 min, modifikuotų portlandcemenčio tešlų statiniai ribiniai šlyties įtempiai nežymiai didėja nuo 30,8 iki 34,0 Pa. Toliau didinant VMA kiekį nuo 1,0 iki 3,0 %, tešlų statiniai ribiniai šlyties įtempiai tolygiai didėja nuo 34,0 iki 49,0 Pa, o didinant iki 3,6 % – intensyviai didėja iki 82,9 Pa.

Nustatyta, kad modifikuotų portlandcemenčio tešlų pradinės struktūros plastinis stiprumas ir jo didėjimo intensyvumas (statinių ribinių šlyties įtempių didėjimas) priklauso nuo VMA kiekio (3.15 pav.).

3.15 paveiksle matoma, kad didinant VMA kiekį nuo 0 iki 3,6 % cemento masės, modifikuotų portlandcemenčio tešlų pradinę struktūrą palaipsniui stiprėja nuo 6,8 iki 14,1 Pa.



**3.15 pav.** Modifikuotų skirtingais klampą modifikuojančios įmaišos (VMA) kiekiais portlandcemenčio tešlų statinių ribinių šlyties įtempių priklausomybė nuo tešlų ramybės būsenos išlaikymo trukmės

**Fig. 3.15.** Dependence of the static yield stresses of Portland cement pastes modified with different amounts of the viscosity modifying admixture (VMA) on the duration of paste keeping at rest

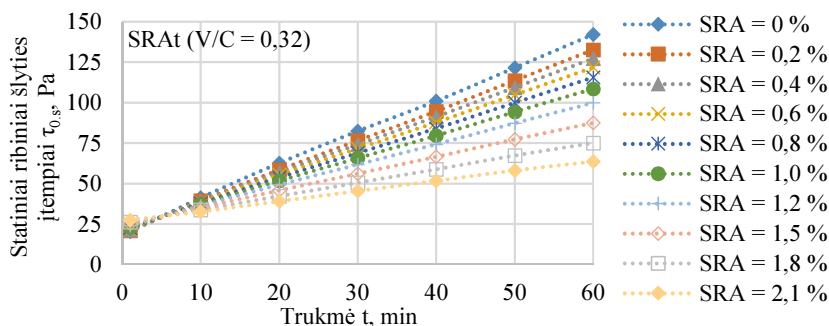
Pažymėtina, kad didinant VMA kiekį nuo 0 iki 1,0 % cemento masės ir išlaikant tešlas ramybės būsenos 61 min, modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros plastinio stiprumo didėjimo intensyvumas nežymiai didėja nuo 0,39 iki 0,41 Pa/min. Toliau didinant VMA kiekį nuo 1,0 iki 3,0 %, tešlų struktūros plastinio stiprumo didėjimo intensyvumas palaipsniui didėja nuo 0,41 iki 0,62 Pa/min, o didinant iki 3,6 % – intensyviai didėja iki 1,15 Pa/min.

Kaip buvo minėta aukščiau (žr. 3.2.2 poskyrį), didinant VMA kiekį didėja jo pagrindą sudarančių polimerų turinė koncentracija tešlos skystojoje fazėje ir jų adsorbcija ant cemento dalelių, fiziškai laikant jas kartu. Tai lemia didėjanti tešlų pradinės struktūros plastinį stiprumą ir jo didėjimo intensyvumą.

Dėl cemento hidratacijos reakcijų vyksta negrįžtami portlandcemenčio tešlų, modifikuotų klampą modifikuojančia įmaiša (VMA), struktūriniai pokyčiai, kuriuos apibūdina ribinių šlyties įtempių ( $\tau_0$ ) padidėjimas laike. Pritaikius tiesinę lygtį, apskaičiuotiems modifikuotų portlandcemenčio tešlų ribiniams šlyties įtempiams po 10 ir 80 min nuo tešlų maišymo pradžios, nustatyta, kad didinant VMA kiekį nuo 0 iki 3,6 % cemento masės, tešlų negrįžtami struktūriniai pokyčiai nežymiai mažėja – nuo 0,0101 iki 0,0046 Pa/min.

Ištirtas traukumą mažinančios įmaišos (SRA) poveikis portlandcemenčio tešlų statiniams ribiniams šlyties įtempiams ( $\tau_{0,s}$ ) ir gauta jų kitimo priklausomybė nuo tešlų ramybės būsenos išlaikymo trukmės (3.16 pav.).

3.16 paveiksle matoma, kad didinant SRA kiekį nuo 0 iki 1,0 % cemento masės, išlaikius tešlas ramybės būsenos 61 min, modifikuotų portlandcemenčio tešlų statiniai ribiniai šlyties įtempiai tolygiai mažėja nuo 142,1 iki 108,5 Pa. Toliau didinant SRA kiekį nuo 1,0 iki 2,1 %, tešlų statiniai ribiniai šlyties įtempiai intensyviai mažėja nuo 108,5 iki 63,6 Pa.



**3.16 pav.** Modifikuotų skirtingais traukumą mažinančios įmaišos (SRA) kiekiais portlandcemenčio tešlų statinių ribinių šlyties įtempių priklausomybė nuo tešlų ramybės būsenos išlaikymo trukmės

**Fig. 3.16.** Dependence of static yield stresses of Portland cement pastes modified with different amounts of shrinkage reducing admixture (SRA) on the duration of paste keeping at rest

Nustatyta, kad modifikuotų portlandcemenčio tešlų pradinės struktūros plastinis stiprumas ir jo didėjimo intensyvumas (statinių ribinių šlyties įtempių didėjimas) priklauso nuo SRA kiekio (3.16 pav.).

3.16 paveiksle matoma, kad didinant SRA kiekį nuo 0 iki 1,0 % cemento masės, modifikuotų portlandcemenčio tešlų pradinė struktūra nežymiai stiprėja nuo 20,2 iki 22,4 Pa. Toliau didinant SRA kiekį nuo 1,0 iki 2,1 %, tešlų pradinė struktūra tolygiai stiprėja nuo 22,4 iki 26,8 Pa.

Pažymėtina, kad didinant SRA kiekį nuo 0 iki 1,0 % cemento masės ir išlaikant tešlas ramybės būsenos 61 min, modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros plastinio stiprumo didėjimo intensyvumas tolygiai mažėja nuo 2,04 iki 1,44 Pa/min. Toliau didinant SRA kiekį nuo 1,0 iki 2,1 %, tešlų struktūros plastinio stiprumo didėjimo intensyvumas intensyviai mažėja nuo 1,44 iki 0,62 Pa/min.

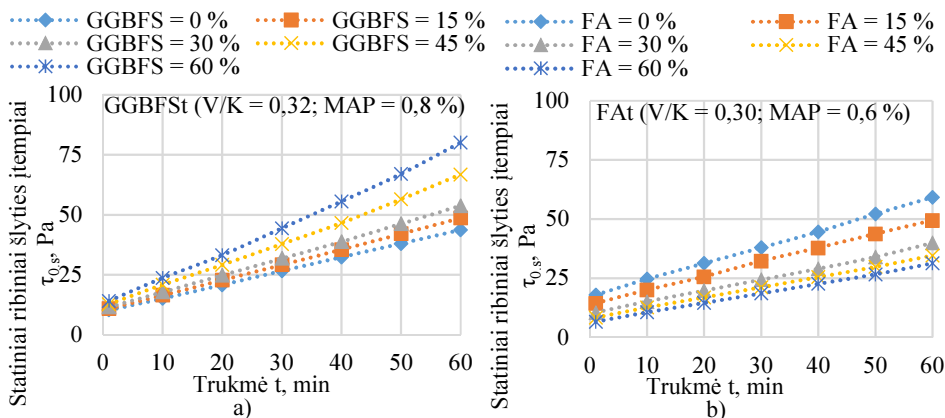
Modifikuotų portlandcemenčio tešlų pradinės struktūros stiprėjimą galima paaiškinti tuo, kad, didinant SRA kiekį tešloje, didėja jos adsorbcija ant cemento dalelių ir tarp jų paviršių susidaranti hidrofobinių traukos jėgų dydis. Kita vertus, SRA mažina cemento dalelių flokuliaciją, nes yra gaminama paviršių aktyvinančių medžiagų pagrindu, ir lėtina jos formavimąsi tešloje dėl hidratacijos reakcijų stabdymo. Todėl didinant SRA kiekį ir išlaikant tešlas ramybės būsenos tam tikrą laiką, tešlų struktūros plastinio stiprumo didėjimo intensyvumas mažėja.

Dėl cemento hidratacijos reakcijų vyksta negrįžtami modifikuotų traukumą mažinančia įmaiša portlandcemenčio tešlų struktūriniai pokyčiai, kuriuos apibūdina ribinių šlyties įtempių ( $\tau_0$ ) padidėjimas laike. Pritaikius tiesinę lygtį, apskaičiuotiems modifikuotų portlandcemenčio tešlų ribiniams šlyties įtempiams po 10 ir 80 min nuo tešlų maišymo pradžios nustatyta, kad didinant SRA kiekį nuo 0 iki 1,0 % cemento masės, tešlų negrįžtami struktūriniai pokyčiai nežymiai mažėja nuo 0,0194 iki 0,0161 Pa/min. Toliau didinant SRA kiekį nuo 1,0 iki 2,1 %, tešlų negrįžtami struktūriniai pokyčiai tolygiai mažėja nuo 0,0161 iki 0,0098 Pa/min.

Ištirtas granuliuoto aukštakrosnių šlako (GGBFS) ir lakiųjų pelenų (FA) poveikis portlandcemenčio tešlų statiniams ribiniams šlyties įtempiams ( $\tau_{0,s}$ ) ir gauta jų kitimo priklausomybė nuo modifikuotų portlandcemenčio tešlų ramybės būsenos išlaikymo trukmės (3.17 pav.).

3.17 a paveiksle matoma, kad keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 0 iki 30 % GGBFS, išlaikius tešlas ramybės būsenos 61 min, modifikuotų portlandcemenčio tešlų statiniai ribiniai šlyties įtempiai nežymiai didėja nuo 43,7 iki 53,8 Pa. Toliau keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 30 iki 60 % GGBFS, tešlų statiniai ribiniai šlyties įtempiai tolygiai didėja nuo 53,8 iki 80,1 Pa.

3.17 b paveiksle matoma, kad keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 0 iki 30 % lakiaisiais pelenais, išlaikius tešlas ramybės būsenos 61 min, modifikuotų portlandcemenčio tešlų statiniai ribiniai šlyties įtempiai tolygiai mažėja nuo 59,2 iki 39,9 Pa. Toliau keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 30 iki 60 % FA, tešlų statiniai ribiniai šlyties įtempiai nežymiai mažėja nuo 39,9 iki 31,3 Pa.



**3.17 pav.** Modifikuotų portlandcemenčio tešlų statinių ribinių šlyties įtempių priklausomybė nuo tešlų ramybės būsenos išlaikymo trukmės: a) su granuliuotu aukštakrosnių šlaku (GGBFS); b) su lakiaisiais pelenais (FA)

**Fig. 3.17.** The dependence of static yield stresses of modified Portland cement pastes on the duration of paste keeping at rest: a) with ground granulated blast furnace slag (GGBFS); (b) with fly ash (FA)

Nustatyta, kad modifikuotų portlandcemenčio tešlų pradinės struktūros plastinis stiprumas ir jo didėjimo intensyvumas (statinių ribinių šlyties įtempių didėjimas) priklauso nuo mineralinio priedo tipo (GGBFS ar FA) ir jo kiekio (3.17 pav.).

3.17 a paveiksle matoma, kad didinant GGBFS (cemento pakaitos) kiekį nuo 0 iki 60 %, modifikuotų portlandcemenčio tešlų pradinė struktūra nežymiai stiprėja nuo 9,6 iki 12,0 Pa. Pažymėtina, kad didinant cemento pakaitos kiekį nuo 0 iki 30 % ir išlaikant tešlas ramybės būsenos 61 min, tešlų struktūros plastinio stiprumo didėjimo intensyvumas nežymiai didėja nuo 0,57 iki 0,71 Pa/min. Toliau keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 30 iki 60 % GGBFS, tešlų struktūros plastinio stiprumo didėjimo intensyvumas tolygiai didėja nuo 0,71 iki 1,11 Pa/min.

Kaip buvo minėta aukščiau (žr. 3.2.2 poskyrį), GGBFS dalelių savitasis paviršius ( $1587 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) yra žymiai mažesnis nei portlandcemenčio dalelių

(4128 cm<sup>2</sup>/g). Pažymėtina, kad GGBFS dalelių paviršius yra kietesnis, o forma kampuotesnė nei portlandcemenčio, kurio dalelių forma labiau panaši į sferinę. Taip pat GGBFS vidutinis dalelių dydis (53,55 μm) yra didesnis, palyginti su portlandcemenčio dalelių vidutiniu dydžiu (21,26 μm). Todėl modifikuotų portlandcemenčio tešlų pradinės struktūros plastinio stiprumo didėjimą ir jo intensyvumo didėjimą galima būtų paaiškinti tuo, kad didėjant stambių ir kampuotų dalelių kiekiui (didinant GGBFS kiekį) ir esant pastovioms kitoms tešlų sudedamosioms, didėja tarp dalelių kontaktinių ryšių skaičius ir tarp jų veikiančių traukos ir trinties (veikiant tešlą šlytimi) jėgų dydis.

3.17 b paveiksle matoma, kad keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 0 iki 30 % lakiaisiais pelenais, modifikuotų portlandcemenčio tešlų pradinė struktūra tolygiai silpnėja nuo 17,3 iki 10,0 Pa. Toliau keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 30 iki 60 % FA, tešlų pradinė struktūra nežymiai silpnėja nuo 10,0 iki 6,2 Pa. Pažymėtina, kad didinant FA (cemento pakaitos) kiekį nuo 0 iki 30 % ir išlaikant tešlas ramybės būsenos 61 min, tešlų struktūros plastinio stiprumo didėjimo intensyvumas tolygiai mažėja nuo 0,69 iki 0,49 Pa/min. Toliau didinant cemento pakaitos kiekį nuo 30 iki 60 %, tešlų struktūros plastinio stiprumo didėjimo intensyvumas nežymiai mažėja nuo 0,49 iki 0,41 Pa/min.

Kaip buvo minėta aukščiau (žr. 3.2.2 poskyrį), FA dalelių savitasis paviršius (3565 cm<sup>2</sup>/g) yra mažesnis, palyginti su portlandcemenčio dalelių savituoju paviršiumi (4128 cm<sup>2</sup>/g). Taip pat FA dalelių forma yra artima sferinei, o jų vidutinis dydis (17,28 μm) yra didesnis nei portlandcemenčio dalelių (12,38 μm). Todėl modifikuotų portlandcemenčio tešlų pradinės struktūros plastinio stiprumo mažėjimą galima būtų paaiškinti tuo, kad didinant FA (cemento pakaitos) kiekį ir esant pastovioms kitoms tešlų sudedamosioms, tešlose didėja laisvojo vandens kiekis dėl mažėjančio dalelių savitojo paviršiaus. Tai lemia didėjančius atstumus tarp dalelių ir tarp jų mažėjančią veikiančių traukos jėgų dydį.

Žinoma, kad lakieji pelenai lėtina cemento hidrataciją dėl lėtesnių pucolanių reakcijų, palyginti su portlandcemenčio hidratacijos reakcijomis. Tai lemia lėtesnį laisvojo vandens kiekio mažėjimą ir ilgesnį jo išlaikymą tešlose nei tešlų be FA. Todėl didinant FA kiekį ir išlaikant tešlas ramybės būsenos tam tikrą laiką, modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros plastinio stiprumo didėjimo intensyvumas mažėja.

Dėl cemento hidratacijos reakcijų vyksta negrįžtami modifikuotų granuliuotu aukštakrosnių šlaku ar lakiaisiais pelenais portlandcemenčio tešlų struktūriniai pokyčiai, kuriuos apibūdina ribinių šlyties įtempių ( $\tau_0$ ) padidėjimas laike. Pritaikius tiesinę lygtį, apskaičiuotiems modifikuotų portlandcemenčio tešlų ribiniams šlyties įtempiams po 10 ir 80 min nuo tešlų maišymo pradžios nustatyta, kad keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 0 iki 60 % mineraliniu priedu, tešlų negrįžtami struktūriniai pokyčiai nežymiai mažėja: nuo 0,0329 iki 0,0193 Pa/min, kai tešlos modifikuotos GGBFS; nuo 0,0266 iki 0,0221 Pa/min –

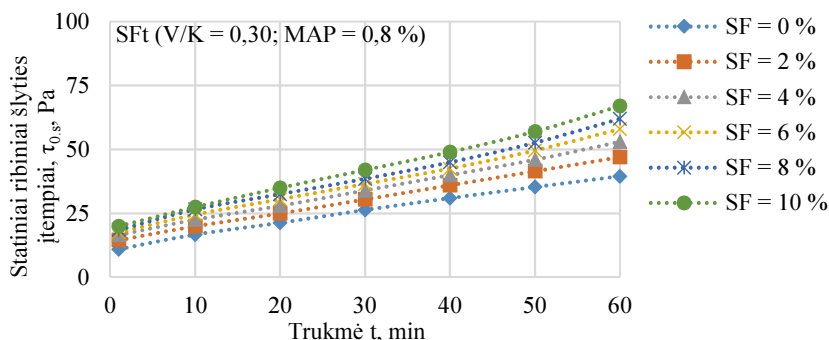


kai FA. Tai gali būti paaiškinama tuo, kad GGBFS ir FA lėtina cemento hidrataciją dėl lėtesnių pucolaninių reakcijų, palyginti su portlandcemenčio hidratacijos reakcijomis. Be to, modifikuotos šiais mineraliniais priedais portlandcemenčio tešlos buvo plastifikuotos superplastikliu (MAP), kuris pasižymi ne tik efektyviu dispergavimo efektu, bet ir hidratacijos reakcijų lėtinimu.

Ištirtas  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių (SF) poveikis portlandcemenčio tešlų statiniams ribiniams šlyties įtempiams ( $\tau_{0,s}$ ) ir gauta jų kitimo priklausomybė nuo tešlų ramybės būsenos išlaikymo trukmės (3.18 pav.).

3.18 paveiksle matoma, kad keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 0 iki 10 %  $\text{SiO}_2$  mikrodulkėmis, išlaikius tešlas ramybės būsenos 61 min, modifikuotų portlandcemenčio tešlų statiniai ribiniai šlyties įtempiai tolygiai didėja nuo 39,6 iki 67,0 Pa.

Nustatyta, kad modifikuotų portlandcemenčio tešlų pradinės struktūros plastinis stiprumas bei jo didėjimo intensyvumas (statinių ribinių šlyties įtempių didėjimas) priklauso nuo SF kiekio (3.18 pav.).



**3.18 pav.** Modifikuotų skirtingais  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių (SF) kiekiais portlandcemenčio tešlų statinių ribinių šlyties įtempių priklausomybė nuo tešlų ramybės būsenos išlaikymo trukmės

**Fig. 3.18.** Dependence of static yield stresses of Portland cement pastes modified with different amounts of  $\text{SiO}_2$  fumes (SF) on the duration of paste keeping at rest

3.18 paveiksle matoma, kad didinant SF kiekį nuo 0 iki 10 %, modifikuotų portlandcemenčio tešlų pradinė struktūra tolygiai stiprėja nuo 11,5 iki 19,2 Pa. Kartu, išlaikant tešlas ramybės būsenos 61 min, tešlų struktūros plastinio stiprumo didėjimo intensyvumas tolygiai didėja nuo 0,48 iki 0,78 Pa/min.

Modifikuotų portlandcemenčio tešlų pradinės struktūros plastinio stiprumo didėjimą galima būtų paaiškinti tuo, kad didinant SF kiekį, tešlose mažėja laisvojo vandens kiekis dėl didėjančio dalelių savitojo paviršiaus. Pažymėtina, kad SF dalelių savitasis paviršius ( $24\,000\text{ cm}^2/\text{g}$ ) yra žymiai didesnis, palyginti su portlandcemenčio dalelių ( $4128\text{ cm}^2/\text{g}$ ). Tai lemia mažėjančius atstumus tarp dalelių ir tarp jų didėjančią veikiančių traukos jėgų dydį.

Žinoma, kad  $\text{SiO}_2$  mikrodulkės greitina cemento hidratacijos reakcijas dėl jose esančio aktyvaus  $\text{SiO}_2$ , kuris reakcijų metu sudaro papildomus kalcio hidro-silikatų kristalizacijos centrus. Tai lemia papildomų tarp dalelių ryšių susidarymą ir traukos jėgų dydžio padidėjimą tarp jų. Todėl didinant SF kiekį ir išlaikant tešlas ramybės būsenos tam tikrą laiką, tešlų struktūros plastinio stiprumo didėjimas intensyvėja.

Dėl cemento hidratacijos reakcijų vyksta negrįžtami modifikuotų  $\text{SiO}_2$  mikrodulkėmis portlandcemenčio tešlų struktūriniai pokyčiai, kuriuos apibūdina ribinių šlyties įtempių ( $\tau_0$ ) padidėjimas laike. Pritaikius tiesinę lygtį, apskaičiuotiems modifikuotų portlandcemenčio tešlų ribiniams šlyties įtempiams po 10 ir 80 min nuo tešlų maišymo pradžios nustatyta, kad keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 0 iki 10 % SF, tešlų negrįžtami struktūriniai pokyčiai didėja nuo 0,0326 iki 0,1384 Pa/min.

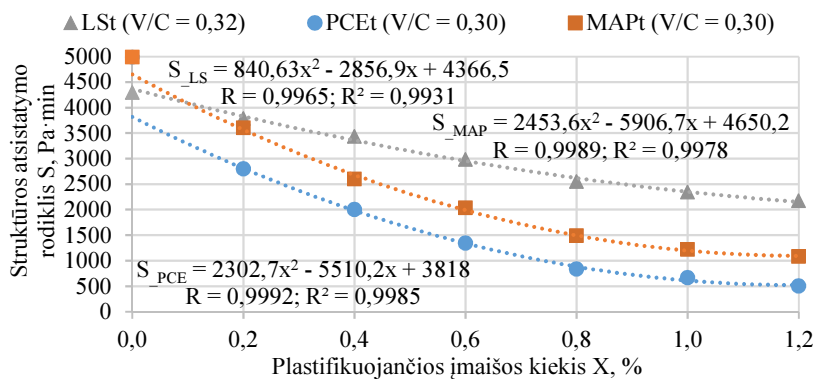
### 3.3.2. Modifikuotų portlandcemenčio tešlų tiksotropiškumas

Portlandcemenčio tešlas, modifikuotas chemine įmaiša (LS, PCE, MAP, AEA, SG, CN, VMA, ar SRA) ar mineraliniu priedu (GGBFS, FA ar SF), išlaikius ramybės būsenos 61 min, gauti negrįžtami struktūriniai pokyčiai buvo atskirti nuo per tą laiką susidariusių tešlų struktūrų pagal (2.1) lygtį. Gauta eksponentinė priklausomybė tarp skirtingo įmaišos ar priedo kiekio ir modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros atsistatymo rodiklio.

Ištirtas plastiklio (LS) ir superplastiklių (PCE ir MAP) poveikis portlandcemenčio tešlų tiksotropiškumui (3.19 pav.).

3.19 paveiksle matoma, kad didinant plastifikuojančios cheminės įmaišos kiekį nuo 0 iki 0,8 % cemento masės, modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros atsistatymo rodiklis, skirtas tešlų tiksotropiškumui įvertinti, mažėja: nuo 4294 iki 2546 Pa·min, kai tešlos modifikuotos plastikliu (LS); nuo 4990 iki 835 Pa·min – kai superplastikliu PCE; nuo 4990 iki 1487 Pa·min – kai superplastikliu MAP. Toliau didinant įmaišos kiekį nuo 0,8 iki 1,2 %, tešlų tiksotropiškumas nežymiai mažėja: nuo 2546 iki 2171 Pa·min, kai tešlos modifikuotos plastikliu; nuo 835 iki 504 Pa·min – kai superplastikliu PCE; nuo 1487 iki 1081 Pa·min – kai superplastikliu MAP.

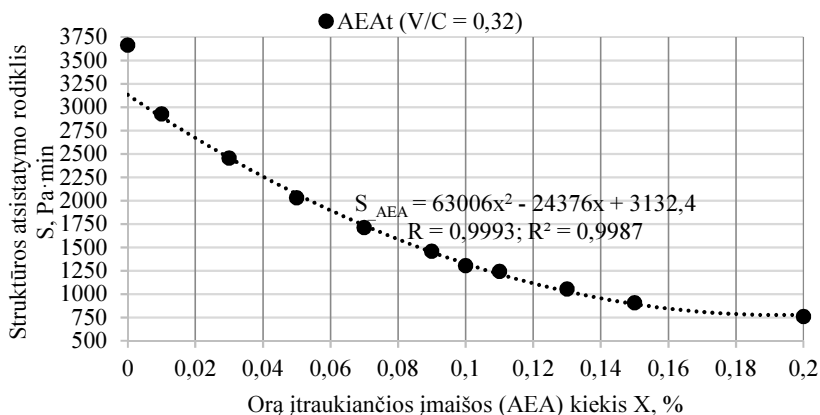
Modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros atsistatymo rodiklio mažėjimą galima būtų paaiškinti tuo, kad, didinant plastifikuojančios cheminės įmaišos kiekį, tešlose mažėja cemento dalelių flokuliacija, nes didėja įmaišos plastifikavimo efektyvumas. Iš gautų rezultatų (3.19 pav.) galima teigti, kad dėl efektyvesnio superplastiklio PCE dispergavimo efekto, palyginti su plastiklio (LS) ar superplastiklio MAP dispergavimo efektu, modifikuotos PCE portlandcemenčio tešlos pasižymi mažiausiu tiksotropiškumu.



**3.19 pav.** Modifikuotų plastikliu (LS) ar superplastikliu (PCE ar MAP) portlandcemenčio tešlų struktūros atsistatymo rodiklio priklausomybė nuo skirtingo plastifikuojančios cheminės įmaišos kiekio

**Fig. 3.19.** Dependence of the index of reversible structure of Portland cement pastes modified with a plasticiser (LS) or superplasticiser (PCE or MAP) on the different amount of plasticising admixture

Ištirtas orą įtraukiančios įmaišos (AEA) poveikis portlandcemenčio tešlų tiksotropiškumui (3.20 pav.).



**3.20 pav.** Modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros atsistatymo rodiklio priklausomybė nuo skirtingo orą įtraukiančios įmaišos (AEA) kiekio

**Fig. 3.20.** Dependence of the index of reversible structure of modified Portland cement paste on different amount of the air entraining admixture (AEA)

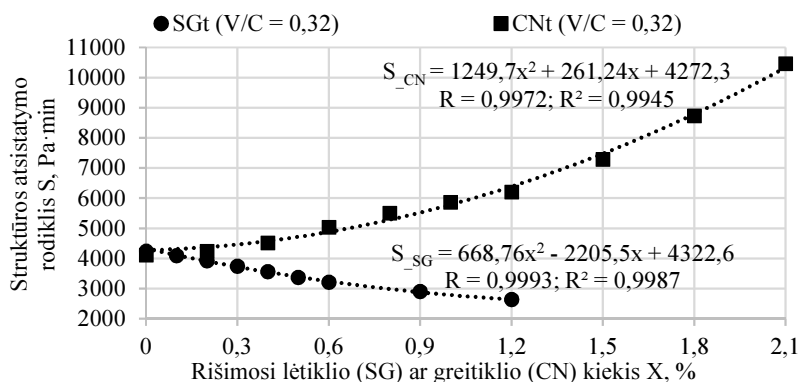
3.20 paveiksle matoma, kad didinant AEA kiekį nuo 0 iki 0,1 % cemento masės, modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros atsistatymo rodiklis, skir-

tas tešlų tiksotropiškumui įvertinti, mažėja nuo 3664 iki 1304 Pa·min. Toliau didinant įmaišos kiekį nuo 0,1 iki 0,2 %, tešlų tiksotropiškumas nežymiai mažėja nuo 1304 iki 760 Pa·min.

Modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros atsistatymo rodiklio mažėjimą (didinant AEA kiekį) galima būtų paaiškinti tuo, kad AEA mažina cemento dalelių flokuliaciją, nes yra gaminama paviršių aktyvinančių medžiagų pagrindu.

Ištirtas rišimosi lėtiklio (SG) ir greitiklio (CN) poveikis portlandcemenčio tešlų tiksotropiškumui (3.21 pav.).

3.21 paveiksle matoma, kad didinant SG kiekį nuo 0 iki 0,6 % cemento masės, modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros atsistatymo rodiklis, skirtas tešlų tiksotropiškumui įvertinti, mažėja nuo 4256 iki 3215 Pa·min. Toliau didinant įmaišos kiekį nuo 0,6 iki 1,2 %, tešlų tiksotropiškumas nežymiai mažėja nuo 3215 iki 2634 Pa·min. Pažymėtina, kad SG (natrio gliukonato pagrindu) yra modifikuotas ir pasižymi ne tik cemento hidratacijos reakcijų stabdymu, bet ir plastifikavimo efektu, kuris sumažina cemento dalelių flokuliaciją tešloje. Todėl didinant SG kiekį ir didėjant jo dispergavimo efektyvumui, modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros atsistatymo rodiklis mažėja.



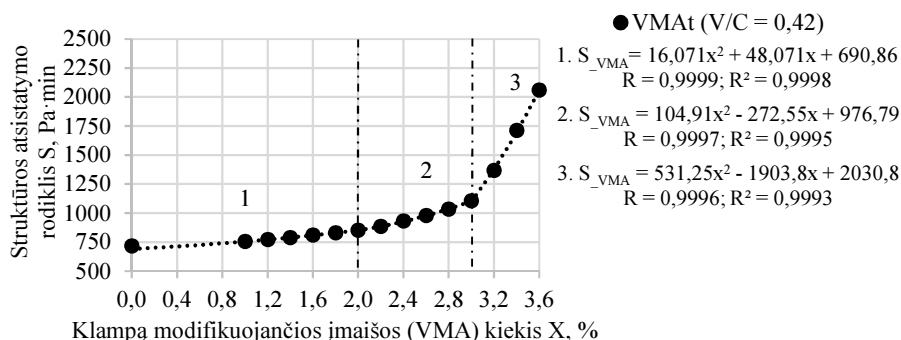
**3.21 pav.** Modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros atsistatymo rodiklio priklausomybė nuo skirtingo rišimosi lėtiklio (SG) ar greitiklio (CN) kiekio

**Fig. 3.21.** Dependence of the index of reversible structure of modified Portland cement paste on different amount of setting retarder (SG) or setting accelerator (CN)

3.21 paveiksle matoma, kad didinant CN kiekį nuo 0 iki 0,4 % cemento masės, modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros atsistatymo rodiklis nežymiai didėja nuo 4117 iki 4520 Pa·min. Toliau didinant įmaišos kiekį nuo 0,4 iki 1,2 %, tešlų struktūros atsistatymo rodiklis didėja nuo 4520 iki 6210 Pa·min, o didinant iki 2,1 % – intensyviai didėja iki 10664 Pa·min.

Modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros atsistatymo rodiklio didėjimą galima būtų paaiškinti tuo, kad didinant CN kiekį tešloje didėja cemento dalelių flokuliacija, nes greitėja vykstantys hidratacijos reakcijų procesai – hidratacijos produktų formavimasis, kalcio hidrosilikatų ir etringito susidarymas.

Ištirtas klampą modifikuojančios įmaišos (VMA) poveikis portlandcemenčio tešlų tiksotropiškumui (3.22 pav.).



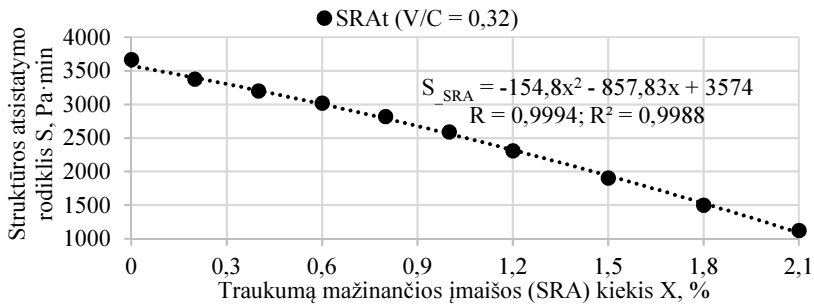
**3.22 pav.** Modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros atsistatymo rodiklio priklausomybė nuo skirtingo klampą modifikuojančios įmaišos (VMA) kiekio  
**Fig. 3.22.** Dependence of the index of reversible structure of modified Portland cement paste on different amount of viscosity modifying admixture (VMA)

3.22 paveiksle matoma, kad didinant VMA kiekį nuo 0 iki 2,0 % cemento masės, modifikuotų tešlų struktūros atsistatymo rodiklis, skirtas tešlų tiksotropiškumui įvertinti, nežymiai didėja – nuo 715 iki 851 Pa·min. Toliau didinant įmaišos kiekį nuo 2,0 iki 3,0 %, tešlų struktūros atsistatymo rodiklis tolygiai didėja nuo 851 iki 1105 Pa·min, o didinant iki 3,6 % – intensyviai didėja iki 2058 Pa·min.

Modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros atsistatymo rodiklio didėjimą galima būtų paaiškinti tuo, kad didinant VMA kiekį didėja cemento dalelių flokuliacija dėl didėjančios jo pagrindą sudarančių polimerų tūrinės koncentracijos tešlos skystojoje fazėje ir jų adsorbcijos ant kelių ar daugiau cemento dalelių, fiziškai laikant jas kartu.

Ištirtas traukumą mažinančios įmaišos (SRA) poveikis portlandcemenčio tešlų tiksotropiškumui (3.23 pav.).

3.23 paveiksle matoma, kad didinant SRA kiekį nuo 0 iki 1,0 % cemento masės, modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros atsistatymo rodiklis, skirtas tešlų tiksotropiškumui įvertinti, tolygiai mažėja nuo 3664 iki 2590 Pa·min. Toliau didinant įmaišos kiekį nuo 1,0 iki 2,1 %, tešlų struktūros atsistatymo rodiklis intensyviai mažėja – nuo 2590 iki 1123 Pa·min.

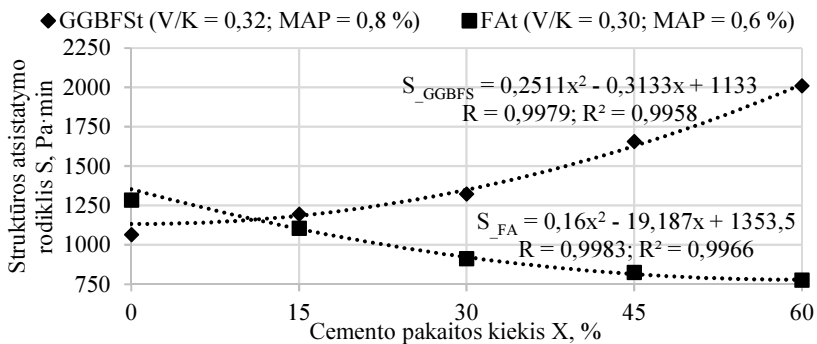


**3.23 pav.** Modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros atsistatymo rodiklio priklausomybė nuo skirtingo traukumą mažinančios įmaišos (SRA) kiekio

**Fig. 3.23.** Dependence of the index of reversible structure of modified Portland cement paste on different amount of shrinkage reducing admixture (SRA)

Modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros atsistatymo rodiklio mažėjimą (didinant SRA kiekį) galima būtų paaiškinti tuo, kad SRA mažina cemento dalelių flokuliaciją, nes yra gaminama paviršių aktyvinančių medžiagų pagrindu, ir lėtina jos formavimąsi tešloje dėl hidratacijos reakcijų stabdymo.

Ištirtas granuluoto aukštakrosnių šlako ir lakiųjų pelenų poveikis portlandcemenčio tešlų tiksotropiškumui (3.24 pav.).



**3.24 pav.** Modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros atsistatymo rodiklio priklausomybė nuo skirtingo granuluoto aukštakrosnių šlako (GGBFS) ar lakiųjų pelenų (FA) kiekio

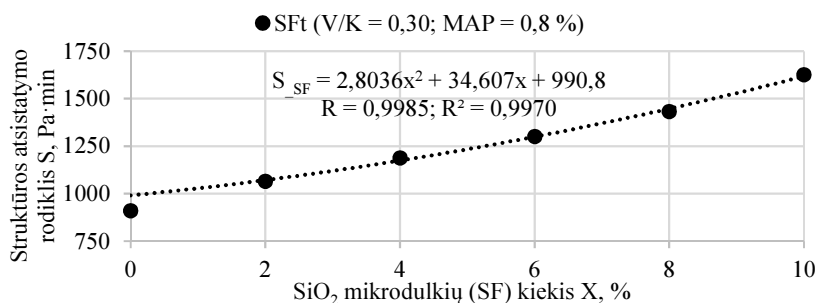
**Fig. 3.24.** Dependence of the index of reversible structure of modified Portland cement paste on different amount of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) or fly ash (FA)

3.24 paveiksle matoma, kad keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 0 iki 30 % GGBFS, modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros atsistatymo rodiklis, skirtas tešlų tiksotropiškumui įvertinti, nežymiai didėja nuo 1063 iki

1322 Pa·min. Toliau keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 30 iki 60 % GGBFS, tešlų struktūros atsistatymo rodiklis tolygiai didėja nuo 1322 iki 2009 Pa·min. Pažymėtina, kad GGBFS dalelių savitasis paviršius ( $1587 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) yra žymiai mažesnis, palyginti su portlandcemenčio dalelių savituoju paviršiumi ( $4128 \text{ cm}^2/\text{g}$ ). Taip pat GGBFS dalelių paviršius yra kietesnis, o forma kampuo-tesnė nei portlandcemenčio, kurio dalelių forma panašesnė į sferinę. Be to, GGBFS vidutinis dalelių dydis ( $53,55 \mu\text{m}$ ) yra didesnis nei portlandcemenčio dalelių ( $21,26 \mu\text{m}$ ). Todėl modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros atsistatymo rodiklio didėjimą galima būtų paaiškinti tuo, kad didinant GGBFS kiekį, tešlose didėja dalelių flokuliacija dėl didėjančio stambiųjų ir kampuo- tų dalelių kiekio.

3.24 paveiksle matoma, kad didinant FA kiekį nuo 0 iki 30 %, modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros atsistatymo rodiklis tolygiai mažėja nuo 1284 iki 912 Pa·min. Toliau didinant cemento pakaitos kiekį nuo 30 iki 60 %, tešlų struktūros atsistatymo rodiklis nežymiai mažėja – nuo 912 iki 775 Pa·min. Pažymėtina, kad FA dalelių savitasis paviršius ( $3565 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) yra mažesnis nei portlandcemenčio dalelių ( $4128 \text{ cm}^2/\text{g}$ ), FA dalelių forma yra artima sferinei, o jų vidutinis dydis ( $17,28 \mu\text{m}$ ) yra didesnis nei portlandcemenčio dalelių ( $12,38 \mu\text{m}$ ), todėl modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros atsistatymo rodiklio mažėjimą galima būtų paaiškinti tuo, kad didinant FA kiekį, tešlose mažėja dalelių flokuliacija dėl mažėjančio jų savitojo paviršiaus.

Ištirtas  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių poveikis portlandcemenčio tešlų tiksotropiškumui (3.25 pav.).



**3.25 pav.** Modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros atsistatymo rodiklio priklausomybė nuo skirtingo  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių (SF) kiekio

**Fig. 3.25.** Dependence of the index of reversible structure of modified Portland cement paste on different amount of the  $\text{SiO}_2$  fumes (SF)

3.25 paveiksle matoma, kad keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 0 iki 10 % SF, modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros atsistatymo rodiklis, skirtas tešlų tiksotropiškumui įvertinti, intensyviai didėja nuo 910 iki

1625 Pa·min. Pažymėtina, kad SF dalelių savitasis paviršius ( $24\,000\text{ cm}^2/\text{g}$ ) yra žymiai didesnis, palyginti su portlandcemenčio dalelių savituoju paviršiumi ( $4128\text{ cm}^2/\text{g}$ ). Taigi modifikuotų portlandcemenčio tešlų struktūros atsistatymo rodiklio didėjimą galima būtų paaiškinti tuo, kad didinant SF kiekį, tešlose didėja dalelių flokuliacija dėl didėjančio jų savitojo paviršiaus.

### 3.4. Cheminių įmaišų ir mineralinių priedų plastifikavimo efektyvumas ir jo poveikis vandens poreikiui vienodo klampumo portlandcemenčio tešloms

Plastifikavimo efektyvumas, kuris yra svarbus technologinis rodiklis (betonavimo ir mišinių transportavimo technologiniuose procesuose) yra vertinamas cementinės tešlos plastinės klampos pokyčio procentais, įmaišius į ją tam tikrą cheminę įmaišą ir (arba) mineralinio priedo kiekį.

Cheminių įmaišų ir mineralinių priedų plastifikavimo efektyvumas apskaičiuojamas pagal (3.1) formulę:

$$Eff_{pl} = \frac{\mu_{pl.0} - \mu_{pl.i}}{\mu_{pl.0}} \cdot 100, \quad (3.1)$$

čia  $Eff_{pl}$  – cheminių įmaišų ir (arba) mineralinių priedų plastifikavimo efektyvumas, %;  $\mu_{pl.0}$  – cementinės tešlos be cheminių įmaišų ir (arba) mineralinių priedų plastinė klampa, Pa·s;  $\mu_{pl.i}$  – modifikuotos cheminėmis įmaišomis ir (arba) mineraliniais priedais cementinės tešlos plastinė klampa, Pa·s.

Išlaikant pastovų V/C santykį ir įmaišant į portlandcemenčio (CIR) tešlą tam tikrą cheminę įmaišą (LS, MAP, PCE, AEA, SG, CN, VMA ar SRA) kiekį ar keičiant portlandcemenčio klinkerio tam tikrą dalį mineraliniu priedu (GGBFS, FA ar SF) buvo nustatytas jų plastifikavimo efektyvumas. Pažymėtina, kad cheminių įmaišų ir mineralinių priedų plastifikavimo efektyvumas nustatytas praėjus 10 min nuo tešlų maišymo pradžios.

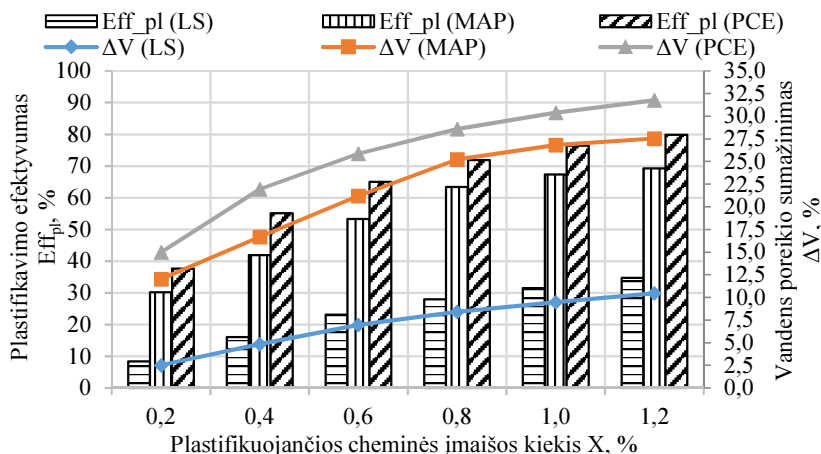
Ištirtas plastiklio modifikuotų lignosulfonatų pagrindu (LS) ir superplastiklių modifikuotų akrilo polimerų (MAP) bei polikarboksilato esterių pagrindu (PCE) plastifikavimo efektyvumas portlandcemenčio tešloms (3.26 pav.).

3.26 paveiksle matoma, kad plastifikuojančios cheminės įmaišos (LS, MAP ar PCE) plastifikavimo efektyvumas priklauso nuo jos cheminės sudėties bei kiekio portlandcemenčio tešloje.

Nustatyta, kad plastiklio (LS) plastifikavimo efektyvumas tolygiai didėja nuo 8,4 iki 34,7 %, didinant įmaišos kiekį nuo 0,2 iki 1,2 % cemento masės (3.26 pav.). Superplastiklio (MAP ar PCE) plastifikavimo efektyvumas intensyviai didėja atitinkamai nuo 30,2 iki 63,4 % ir nuo 37,7 iki 71,9 %, didinant



įmaišų kiekius nuo 0,2 iki 0,8 % cemento masės (3.26 pav.). Toliau didinant superplastiklio (MAP ar PCE) kiekį nuo 0,8 iki 1,2 %, jų plastifikavimo efektyvumas nežymiai didėja atitinkamai nuo 63,4 iki 69,2 % ir nuo 71,9 iki 80 %.



**3.26 pav.** Plastiklio (LS) ir superplastiklio (MAP ir PCE) plastifikavimo efektyvumas bei jo poveikis modifikuotų portlandcemenčio tešlų vandens poreikio pokyčiui išlaikant vienodą jų klampumą

**Fig. 3.26.** Plasticisation efficiency of the plasticiser (LS) and superplasticisers (MAP and PCE), and their effect on the changes in the water demand of modified Portland cement pastes, while maintaining their identical viscosity

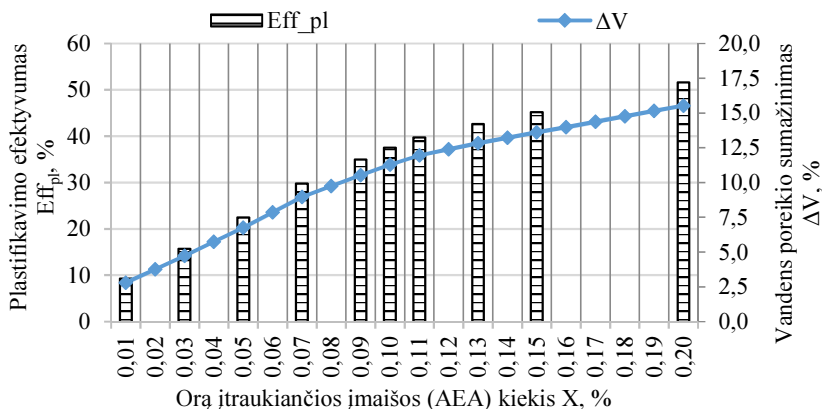
Apibendrinant galima teigti, kad superplastiklis PCE pasižymi didesniu plastifikavimo efektyvumu nei plastiklis (LS) ar superplastiklis MAP. Rekomenduojamas superplastiklio PCE kiekis – 0,8 % cemento masės.

Eksperimentiškai buvo nustatytas vandens poreikio pokytis vienodo klampumo modifikuotoms portlandcemenčio tešloms gauti (3.26 pav.). Tešlos buvo modifikuotos skirtinga plastifikuojančia chemine įmaiša (skirtingos cheminės sudėties) ir skirtingu jos kiekiu (nuo 0,2 iki 1,2 % cemento masės).

Ištirta, kad didinant plastiklio (LS) kiekį nuo 0,2 iki 1,2 % cemento masės, vandens poreikio sumažinimas vienodo klampumo modifikuotoms portlandcemenčio tešloms gauti tolygiai didėja nuo 2,5 iki 10,5 %. Taip pat nustatyta, kad didinant superplastiklio (MAP ar PCE) kiekį nuo 0,2 iki 0,8 % cemento masės, tešlos vandens poreikio sumažinimas intensyviai didėja – atitinkamai nuo 12,0 iki 25,2 % ir nuo 15 iki 28,6 %. Toliau didinant superplastiklio (MAP ar PCE) kiekį nuo 0,8 iki 1,2 %, tešlos vandens poreikio sumažinimas nežymiai didėja atitinkamai nuo 25,2 iki 27,5 % ir nuo 28,6 iki 31,8 %.

Apibendrinant gautus rezultatus (3.26 pav.) galima teigti, kad superplastiklis PCE pasižymi ne tik didesniu plastifikavimo efektyvumu, bet ir modifikuotos portlandcemenčio tešlos vandens poreikio sumažinimu, palyginus su plastikliu (LS) ar superplastikliu MAP.

Ištirtas orą įtraukiančios įmaišos (AEA) paviršių aktyvinančių medžiagų pagrindu plastifikavimo efektyvumas portlandcemenčio tešloms (3.27 pav.).



**3.27 pav.** Orą įtraukiančios įmaišos (AEA) plastifikavimo efektyvumas ir jo poveikis modifikuotų portlandcemenčio tešlų vandens poreikio pokyčiui išlaikant vienodą jų klampumą

**Fig. 3.27.** Plasticisation efficiency of air entraining admixture (AEA) and its effect on the changes in the water demand of modified Portland cement pastes, while maintaining their identical viscosity

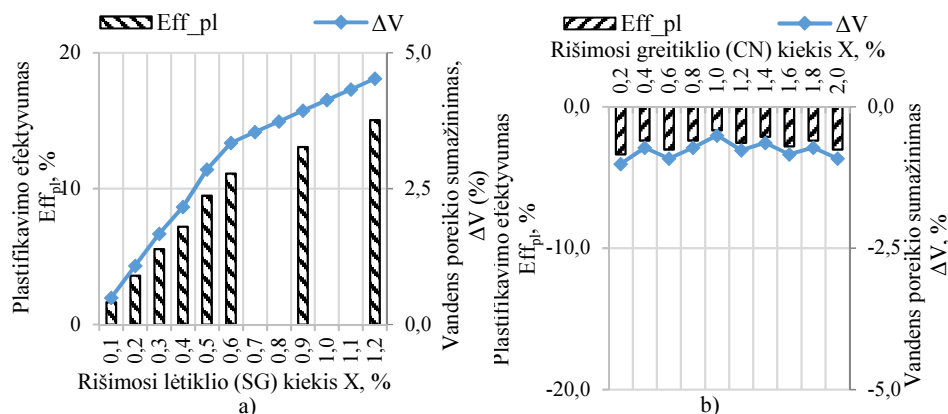
3.27 paveiksle matoma, kad AEA plastifikavimo efektyvumas priklauso nuo jos kiekio portlandcemenčio tešloje.

Nustatyta, kad AEA plastifikavimo efektyvumas intensyviai didėja nuo 9,3 iki 37,5 %, didėjant įtraukto oro kiekiui tešloje su įmaišos kiekiu nuo 0,01 iki 0,1 % cemento masės (3.27 pav.). Toliau didinant AEA kiekį nuo 0,1 iki 0,2 %, jos plastifikavimo efektyvumas didėja nuo 37,5 iki 51,6 %.

Eksperimentiškai buvo nustatytas vandens poreikio pokytis vienodo klampumo modifikuotoms portlandcemenčio tešloms gauti (3.27 pav.). Tešlos buvo modifikuotos skirtingu orą įtraukiančios įmaišos kiekiu (nuo 0,01 iki 0,2 % cemento masės).

Nustatyta, kad didinant AEA kiekį nuo 0,01 iki 0,1 % cemento masės, vandens poreikio sumažinimas vienodo klampumo modifikuotoms portlandcemenčio tešloms gauti tolygiai didėja nuo 2,8 iki 11,3 %. Toliau didinant įmaišos kiekį nuo 0,1 iki 0,2 %, tešlos vandens poreikio sumažinimas nežymiai didėja nuo 11,3 iki 15,5 %.

Ištirtas rišimosi lėtiklio natrio gliukonato pagrindu (SG) ir greitiklio kalcio nitrato pagrindu (CN) plastifikavimo efektyvumas portlandcemenčio tešloms (3.28 pav.).



**3.28 pav.** Cheminės įmaišos plastifikavimo efektyvumas ir jo poveikis modifikuotų portlandcemenčio tešlų vandens poreikio pokyčiui išlaikant vienodą jų klampumą:  
a) – rišimosi lėtiklio (SG); b) – rišimosi greitiklio (CN)

**Fig. 3.28.** Plasticisation efficiency of a chemical admixture and its effect on water demand of modified Portland cement pastes, while maintaining their identical viscosity:  
a) – by a setting retarder (SG); b) – by a setting accelerator (CN)

3.28 a paveiksle matoma, kad SG plastifikavimo efektyvumas priklauso nuo jo kiekio portlandcemenčio tešloje. Nustatyta, kad didinant SG kiekį nuo 0,1 iki 0,6 % cemento masės, jo plastifikavimo efektyvumas palaipsniui didėja nuo 1,6 iki 11,1 %. Toliau didinant įmaišos kiekį nuo 0,6 iki 1,2 %, jos plastifikavimo efektyvumas nežymiai didėja nuo 11,1 iki 15,0 %.

Taip pat nustatyta, kad didinant CN kiekį nuo 0,2 iki 1,0 % cemento masės, jo plastifikavimo efektyvumas nežymiai didėja nuo -3,4 iki -1,7 % (3.28 pav. b). Toliau didinant įmaišos kiekį nuo 1,0 iki 2,0 %, jos plastifikavimo efektyvumas nežymiai mažėja nuo -1,7 iki -3,0 %.

Apibendrinant gautus rezultatus (3.28 pav.) galima teigti, kad rišimosi lėtiklis padidina plastifikavimo efektyvumą iki 15,0 %, kai jo kiekis yra 1,2 % cemento masės, o rišimosi greitiklis mažai keičia plastifikavimo efektyvumą, t. y. sumažina iki -3,4 % (esant 0,2 % įmaišos kiekiui).

Eksperimentiškai buvo nustatytas vandens poreikio pokytis vienodo klampumo modifikuotoms portlandcemenčio tešloms gauti (3.28 pav.). Tešlos buvo modifikuotos skirtinga chemine įmaiša (SG ar CN) ir skirtingu jos kiekiu (nuo 0,1 iki 1,2 % cemento masės, kai tešlos modifikuotos SG; nuo 0,2 iki 2,0 %, kai CN).

Ištirta, kad didinant SG kiekį nuo 0,1 iki 1,2 % cemento masės, vandens poreikio sumažinimas vienodo klampumo modifikuotoms portlandcemenčio tešloms gauti didėja nuo 0,5 iki 4,5 % (3.28 pav. a). Taip pat ištirta, kad esant skirtingiems CN kiekiams (nuo 0,2 iki 2,0 % cemento masės), vandens poreikio pokytis vienodo klampumo modifikuotoms portlandcemenčio tešloms gauti nežymiai kinta (3.28 pav. b).

Apibendrinant gautus rezultatus (3.28 pav.) galima teigti, kad tik rišimosi lėtiklis (SG) pasižymi plastifikavimo efektyvumu ir didina vandens poreikio sumažinimą vienodo klampumo modifikuotoms portlandcemenčio tešloms gauti.

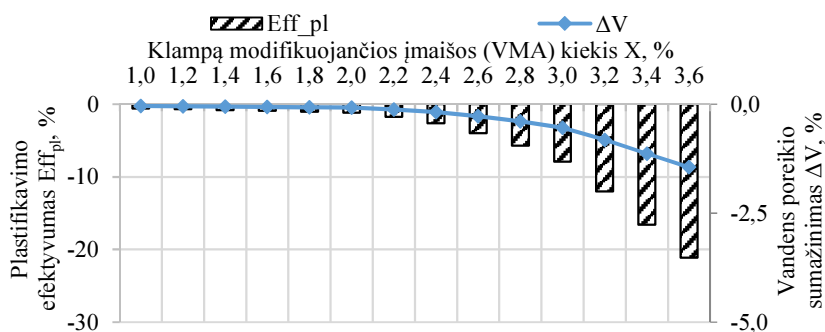
Ištirtas klampą modifikuojančios įmaišos (VMA) polimerų pagrindu plastifikavimo efektyvumas portlandcemenčio tešloms (3.29 pav.).

3.29 paveiksle matoma, kad VMA plastifikavimo efektyvumas priklauso nuo jo kiekio portlandcemenčio tešloje.

Nustatyta, kad didinant VMA kiekį nuo 1,0 iki 2,0 % cemento masės, jo plastifikavimo efektyvumas nežymiai kinta (3.29 pav.). Toliau didinant įmaišos kiekį nuo 2,0 iki 3,0 %, jos plastifikavimo efektyvumas tolygiai mažėja nuo –1,1 iki –7,9 %, o didinant iki 3,6 % – intensyviai mažėja iki –21,1 %.

Eksperimentiškai buvo nustatytas vandens poreikio pokytis vienodo klampumo modifikuotoms portlandcemenčio tešloms gauti (3.29 pav.). Tešlos buvo modifikuotos skirtingu klampą modifikuojančios įmaišos kiekiu (nuo 1,0 iki 3,6 % cemento masės).

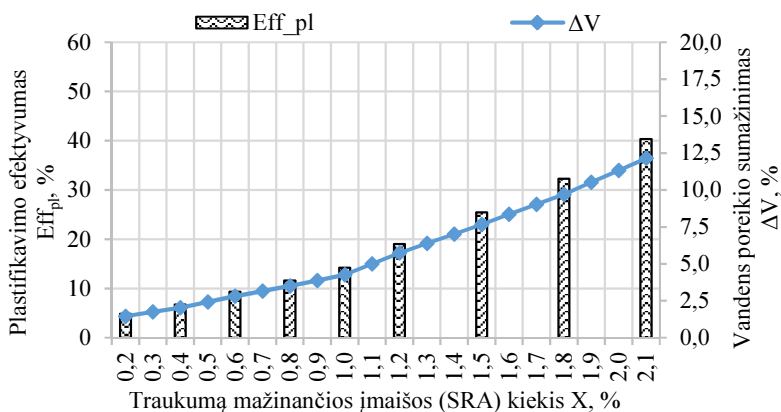
Nustatyta, kad didinant VMA kiekį nuo 1,0 iki 2,0 % cemento masės, vandens poreikio pokytis vienodo klampumo modifikuotoms portlandcemenčio tešloms gauti nežymiai kinta. Toliau didinant VMA kiekį nuo 2,0 iki 3,6 %, tešlų vandens poreikio padidėjimas didėja nuo 0,1 iki 1,4 %.



**3.29 pav.** Klampą modifikuojančios įmaišos (VMA) plastifikavimo efektyvumas ir jo poveikis modifikuotų portlandcemenčio tešlų vandens poreikio pokyčiui išlaikant vienodą jų klampumą

**Fig. 3.29.** Plasticisation efficiency of viscosity modifying admixture (VMA) and its effect on changes in water demand of modified Portland cement pastes, while maintaining their identical viscosity

Ištirtas traukumą mažinančios įmaišos polimerų pagrindu plastifikavimo efektyvumas portlandcemenčio tešloms (3.30 pav.).



**3.30 pav.** Traukumą mažinančios įmaišos (SRA) plastifikavimo efektyvumas bei jo poveikis modifikuotų portlandcemenčio tešlų vandens poreikio pokyčiui išlaikant vienodą jų klampumą

**Fig. 3.30.** Plasticisation efficiency of shrinkage reducing admixture (SRA) and its effect on changes in the water demand of modified Portland cement pastes, while maintaining their identical viscosity

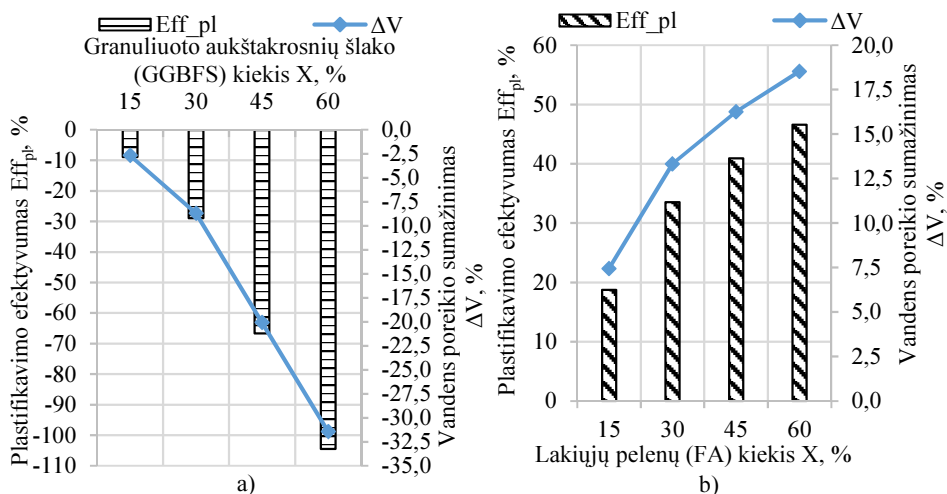
3.30 paveiksle matoma, kad SRA plastifikavimo efektyvumas priklauso nuo jos kiekio portlandcemenčio tešloje.

Nustatyta, kad didinant SRA kiekį nuo 0,2 iki 1,0 % cemento masės, jos plastifikavimo efektyvumas tolygiai didėja nuo 4,8 iki 14,2 % (3.30 pav.). Toliau didinant įmaišos kiekį nuo 1,0 iki 2,1 %, jos plastifikavimo efektyvumas intensyviai didėja nuo 14,2 iki 40,3 %.

Eksperimentiškai buvo nustatytas vandens poreikio pokytis vienodo klampumo modifikuotoms portlandcemenčio tešloms gauti (3.31 pav.). Tešlos buvo modifikuotos skirtingu traukumą mažinančios įmaišos kiekiu (nuo 0,2 iki 2,1 % cemento masės).

Nustatyta, kad didinant SRA kiekį nuo 0,2 iki 1,0 % cemento masės, vandens poreikio sumažinimas vienodo klampumo modifikuotoms portlandcemenčio tešloms gauti nežymiai didėja nuo 1,5 iki 4,3 %. Toliau didinant SRA kiekį nuo 1,0 iki 2,1 %, tešlos vandens poreikio sumažinimas intensyviai didėja nuo 4,3 iki 12,1 %.

Ištirtas granuliuoto aukštakrosnių šlako ir lakiųjų pelenų plastifikavimo efektyvumas portlandcemenčio tešloms (3.31 pav.).



**3.31 pav.** Mineralinio priedo plastifikavimo efektyvumas ir jo poveikis modifikuotų portlandcemenčio tešlų vandens poreikio pokyčiui išlaikant vienodą jų klampumą:

a) – granulioto aukštakrosnių šlako (GGBFS); b) – lakiųjų pelenų (FA)

**Fig. 3.31.** Plasticisation efficiency of a mineral additive and its effect on water demand of modified Portland cement pastes, while maintaining their identical viscosity:

a) – by a ground granulated blast furnace slag (GGBFS); b) – by a fly ash (FA)

3.31 paveiksle matoma, kad GGBFS ar FA plastifikavimo efektyvumas priklauso nuo jų kiekio portlandcemenčio tešloje.

Nustatyta, kad keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 15 iki 30 % GGBFS, jo plastifikavimo efektyvumas mažėja nuo –8,9 iki –28,9 % (3.31 pav. a). Toliau keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 30 iki 60 % GGBFS, jo plastifikavimo efektyvumas intensyviai mažėja nuo –28,9 iki –104,4 %.

Taip pat nustatyta, kad didinant FA kiekį nuo 15 iki 30 %, jų plastifikavimo efektyvumas intensyviai didėja nuo 18,8 iki 33,5 % (3.31 pav. b). Toliau didinant cemento pakaitos kiekį nuo 30 iki 60 %, jos plastifikavimo efektyvumas didėja mažiau – nuo 33,5 iki 46,6 %.

Eksperimentiškai buvo nustatytas vandens poreikio pokytis vienodo klampumo modifikuotoms portlandcemenčio tešloms gauti (3.31 pav.). Tešlos buvo modifikuotos skirtingu mineraliniu priedu (GGBFS ar FA) ir jo kiekiu (nuo 15 iki 60 % cemento masės).

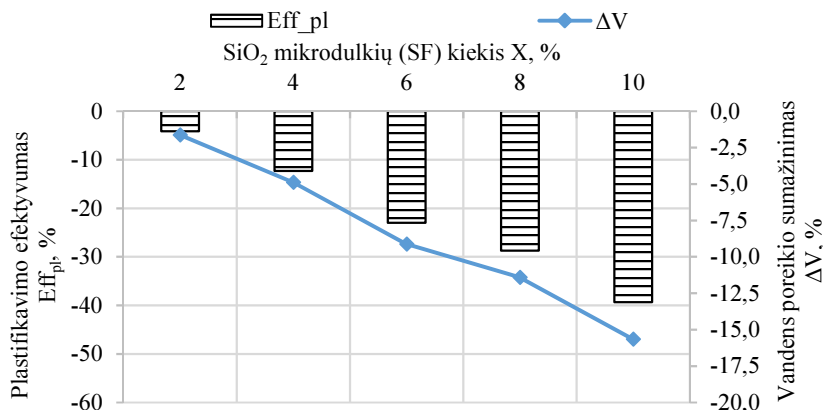
Iširta, kad keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 15 iki 30 % GGBFS, vandens poreikio padidėjimas vienodo klampumo modifikuotoms portlandcemenčio tešloms gauti nežymiai didėja – nuo 2,7 iki 8,7 % (3.31 pav. a).

Toliau keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 30 iki 60 % GGBFS, tešlos vandens poreikio padidėjimas intensyviai didėja nuo 8,7 iki 31,4 %.

Taip pat ištirta, kad didinant FA kiekį nuo 15 iki 30 %, vandens poreikio sumažinimas vienodo klampumo modifikuotoms portlandcemenčio tešloms gauti intensyviai didėja nuo 7,5 iki 13,3 % (3.31 pav. b). Toliau didinant cemento pakaitos kiekį nuo 30 iki 60 %, tešlos vandens poreikio sumažinimas nežymiai didėja nuo 13,3 iki 18,5 %.

Apibendrinant gautus tyrimų rezultatus (3.31 pav.) galima teigti, kad pakeitus portlandcemenčio klinkerio dalį ir 30 % FA, cemento pakaita efektyviai padidina tiek plastifikavimo efektyvumą (iki 33,5 %), ir vandens poreikio sumažinimą (iki 13,3 %). Rekomenduojamas optimalus FA kiekis – 30 %.

Ištirtas  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių plastifikavimo efektyvumas portlandcemenčio tešloms (3.32 pav.).



**3.32 pav.**  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių (SF) plastifikavimo efektyvumas ir jo poveikis modifikuotų portlandcemenčio tešlų vandens poreikio pokyčiui išlaikant vienodą jų klampumą

**Fig. 3.32.** Plasticisation efficiency of  $\text{SiO}_2$  fumes (SF) and its effect on changes in the water demand of modified Portland cement pastes, while maintaining their identical viscosity

3.32 paveiksle matoma, kad SF plastifikavimo efektyvumas priklauso nuo jų kiekio portlandcemenčio tešloje.

Nustatyta, kad keičiant portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 2 iki 10 % SF, jų plastifikavimo efektyvumas palaipsniui mažėja nuo -4,1 iki -39,3 %.

Eksperimentiškai buvo nustatytas vandens poreikio pokytis vienodo klampumo modifikuotoms portlandcemenčio tešloms gauti (3.32 pav.). Tešlos buvo modifikuotos pakeitus portlandcemenčio klinkerio dalį nuo 2 iki 10 %  $\text{SiO}_2$  mikrodulkėmis.

Gauta, kad didinant SF kiekį nuo 2 iki 10 %, vandens poreikio padidėjimas vienodo klampumo modifikuotoms portlandcemenčio tešloms gauti palaipsniui didėja nuo 1,6 iki 15,7 %.

### 3.5. Cheminėmis įmaišomis ir mineraliniais priedais modifikuotų cementinių mišinių džūstamasis traukumas

#### 3.5.1. Vandens poreikio įtaka cementinių skiedinių džūstamajam traukumui

Tyrimo metu nustatytas vandens poreikio pokyčio poveikis cementinių skiedinių džūstamajam traukumui, esant skirtingai jų kietėjimo trukmei (3.33 pav.). Taip pat nustatytos cementinių skiedinių su skirtingu vandens poreikiu technologinės savybės (3.1 lentelė).

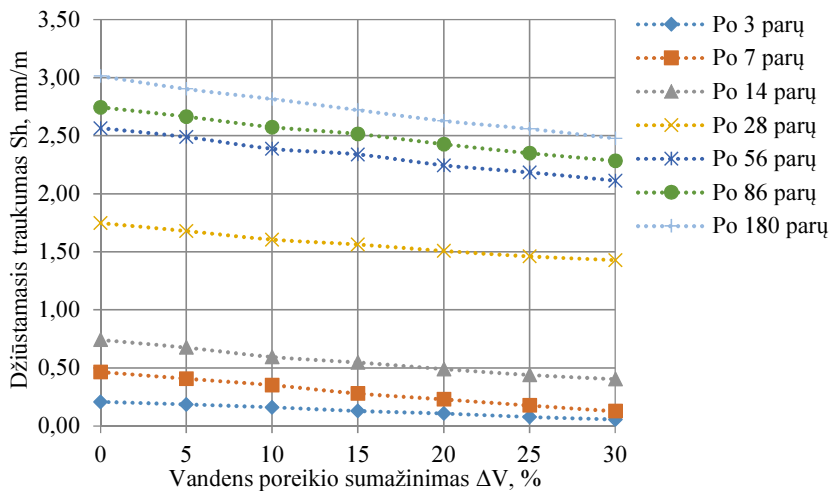
3.1 lentelėje matoma, kad mažinant vandens poreikį nuo 0 iki 15 % ir išlaikant pastovią skiedinio konsistenciją (sklidumą), jo tankis nežymiai didėja nuo 2230 iki 2240 kg/m<sup>3</sup>. Toliau mažinant vandens poreikį nuo 15 iki 30 %, skiedinio tankis didėja nuo 2240 iki 2275 kg/m<sup>3</sup>. Pažymėtina, kad Vsk4, Vsk5 ir Vsk6 pasižymi žymiai didesniu superplastiklio poreikiu nei Vsk1–Vsk3, siekiant išlaikyti vienodą jų konsistenciją (2.12 lentelė). Palyginti su kontroliniu Vsk0 tankiu (2230 kg/m<sup>3</sup>), Vsk4 tankis padidėjo 24 kg/m<sup>3</sup>, Vsk5 – 36 kg/m<sup>3</sup>, o Vsk6 – 45 kg/m<sup>3</sup> (3.1 lentelė). Tam įtakos galėjo turėti pasikeitusi skiedinio mišinio granulometriją įvedus didesnę smėlio kiekį (2.12 lentelė).

**3.1 lentelė.** Cementinių skiedinių su skirtingu vandens poreikiu technologinės savybės  
**Table 3.1.** Technological properties of cement mortars with a different water demand

Skiedinio žymuo	Vsk0	Vsk1	Vsk2	Vsk3	Vsk4	Vsk5	Vsk6
Vandens poreikio sumažinimas $\Delta V$ , %	0	5	10	15	20	25	30
V/C	0,53	0,50	0,47	0,45	0,42	0,38	0,35
Mišinio tankis $q_{miš.}$ , kg/m <sup>3</sup>	2230	2233	2236	2240	2254	2266	2275
Sklidumas Sk, cm	12,0	12,0	12,0	12,0	11,5	11,5	11,5

3.33 paveiksle matoma, kad mažinant vandens poreikį nuo 0 iki 20 %, skiedinių džūstamasis traukumas tolygiai mažėja nuo 1,75 iki 1,50 mm/m ir nuo 3,03 iki 2,61 mm/m, atitinkamai – po 28 ir 180 kietėjimo parų.





**3.33 pav.** Cementinių skiedinių džiūstamojo traukumo priklausomybė nuo vandens poreikio sumažinimo

**Fig. 3.33.** Dependence of drying shrinkage of cement mortars on the reduction of water demand

Toliau mažinant vandens poreikį iki 30 %, skiedinių džiūstamasis traukumas nežymiai mažėja: po 28 parų – iki 1,44 mm/m, po 180 parų – iki 2,49 mm/m. Vadinas, džiūstamasis traukumas priklauso ne tik nuo vandens poreikio mišinyje, bet ir cementinio akmens mikrostruktūros ir kapiliarinių porų charakteristikų.

### 3.5.2. Tešlos kiekio įtaka cementinių skiedinių džiūstamajam traukumui

Nustatytas tešlos kiekio pokyčio poveikis cementinių skiedinių džiūstamajam traukumui, esant skirtingai jų kietėjimo trukmei (3.34 pav.). Taip pat nustatytos modifikuotų skirtingu tešlos kiekiu cementinių skiedinių technologinės savybės (3.2 lentelė).

3.2 lentelėje matoma, kad mažinant cementinės tešlos kiekį nuo 0 iki 15 % ir išlaikant pastovią skiedinio konsistenciją (sklidumą), jo tankis nežymiai didėja – nuo 2224 iki 2234 kg/m<sup>3</sup>. Toliau mažinant tešlos kiekį nuo 15 iki 25 %, skiedinio tankis tolygiai didėja nuo 2234 iki 2274 kg/m<sup>3</sup>.

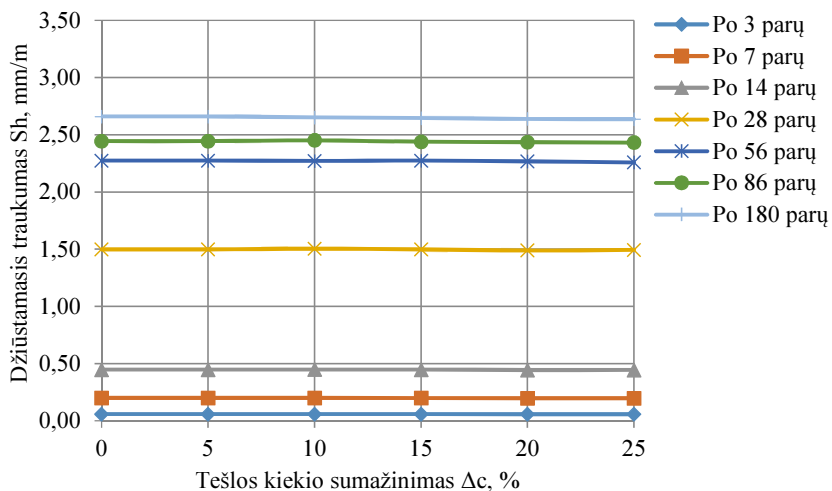
Pažymėtina, kad CTsk3, CTsk4 ir CTsk5 pasižymi žymiai didesniu superplastiklio poreikiu nei CTsk1 ar CTsk2, siekiant išlaikyti vienodą jų konsistenciją (2.13 lentelė). Palyginti su kontroliniu CTsk0 tankiu (2224 kg/m<sup>3</sup>), CTsk3 tankis padidėjo 20 kg/m<sup>3</sup>, CTsk4 – 35 kg/m<sup>3</sup>, o CTsk4 – 50 kg/m<sup>3</sup> (3.2 lentelė). Tam

įtakos galėjo turėti pasikeitusi skiedinio mišinio granulometrija, įvedus didesnę smėlio kiekį (2.13 lentelė).

**3.2 lentelė.** Modifikuotų skirtingu tešlos kiekiu cementinių skiedinių technologinės savybės

**Table 3.2.** Technological properties of cement mortars modified with a different content of paste

Skiedinio žymuo	CTsk0	CTsk1	CTsk2	CTsk3	CTsk4	CTsk5
Cementinės tešlos kiekio sumažinimas $\Delta c$ , %	0	5	10	15	20	25
V/C	0,53	0,53	0,53	0,53	0,52	0,51
Mišinio tankis $q_{miš.}$ , kg/m <sup>3</sup>	2224	2214	2218	2244	2259	2274
Sklidumas Sk, cm	12,0	12,0	12,0	11,5	11,5	11,5



**3.34 pav.** Cementinių skiedinių džiūstamojo traukumo priklausomybė nuo cementinės tešlos kiekio sumažinimo

**Fig. 3.34.** Dependence of drying shrinkage of cement mortars on the reduction of the content of a cement paste

Didinant ar mažinant V/C santykį kinta cementinių skiedinių džiūstamojo traukumo deformacijos. Nustatyta, kad džiūstamasis traukumas kinta ne nuo vandens kiekio (3.34 pav.), o nuo V/C santykio (3.33 pav.). Tai gali būti dėl to, kad V/C santykis koreguoja cementinių skiedinių poringumą.

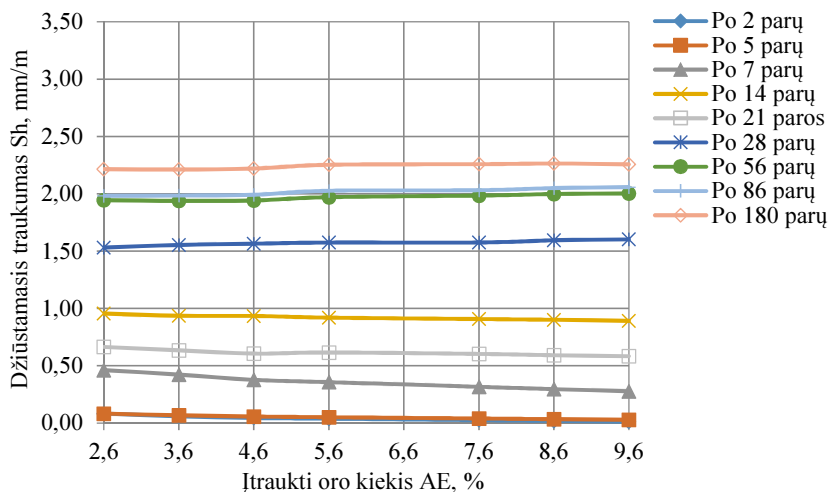
### 3.5.3. Įtraukto oro kiekio įtaka cementinių skiedinių džiūstamajam traukumui

Nustatytas įtraukto oro kiekio poveikis cementinių skiedinių džiūstamajam traukumui, esant skirtingai jų kietėjimo trukmei (3.35 pav.). Taip pat nustatytos modifikuotų skirtingu orą įtraukiančios įmaišos kiekiu cementinių skiedinių technologinės savybės (3.3 lentelė).

**3.3 lentelė.** Modifikuotų skirtingu orą įtraukiančios įmaišos (AEA) kiekiu cementinių skiedinių technologinės savybės

**Table 3.3.** Technological properties of cement mortars modified with a different amount of air entraining admixture (AEA)

Skiedinio žymuo	AEAsk0	AEAsk1	AEAsk2	AEAsk3	AEAsk4	AEAsk5	AEAsk6
AEA X, %	0	0,03	0,06	0,09	0,12	0,13	0,15
V/C	0,52						
Įtraukto oro kiekis AE, %	2,6	3,6	4,6	5,6	7,6	8,6	9,6
Mišinio tankis $q_{\text{miš.}}$ , kg/m <sup>3</sup>	2346	2318	2290	2260	2235	2215	2200
Sklidumas Sk, cm	12,0	12,0	12,5	12,5	13,5	13,5	14,0



**3.35 pav.** Cementinių skiedinių džiūstamojo traukumo priklausomybė nuo įtraukto oro kiekio

**Fig. 3.35.** Dependence of drying shrinkage of cement mortars on the amount of the entrained air

3.3 lentelėje matoma, kad didėjant įtraukto oro kiekiui nuo 2,6 iki 9,6 % (didinant AEA kiekį nuo 0 iki 0,15 % cemento masės), modifikuoto cementinio skiedinio konsistencija (sklidumas) didėja nuo 12,0 iki 14,0 cm, o jo tankis mažėja nuo 2340 iki 2200 kg/m<sup>3</sup>.

3.35 paveiksle matoma, kad didėjant įtraukto oro kiekiui nuo 2,6 iki 9,6 % (didinant AEA kiekį nuo 0 iki 0,15 % cemento masės) ir ilgėjant kietėjimo trukmei, modifikuotų cementinių skiedinių džiūstamasis traukumas nežymiai didėja. Tai gali būti paaiškinama tuo, kad uždaros poros cementiniame mišinyje neužsipildo vandeniu. Todėl kietėjant mišiniai nebrinksta – esant drėgnoms aplinkos sąlygoms, ir nesitraukia – esant sausoms aplinkos sąlygoms.

### 3.5.4. Traukumą mažinančios įmaišos poveikis cementinių skiedinių džiūstamajam traukumui

Nustatytas traukumą mažinančios įmaišos (SRA) poveikis cementinių skiedinių džiūstamajam traukumui, esant skirtingai jų kietėjimo trukmei (3.36 pav.). Taip pat nustatytos modifikuotų skirtingu SRA kiekiu cementinių skiedinių technologinės savybės (3.4 lentelė).

**3.4 lentelė.** Modifikuotų skirtingu traukumą mažinančios įmaišos (SRA) kiekiu cementinių skiedinių technologinės savybės

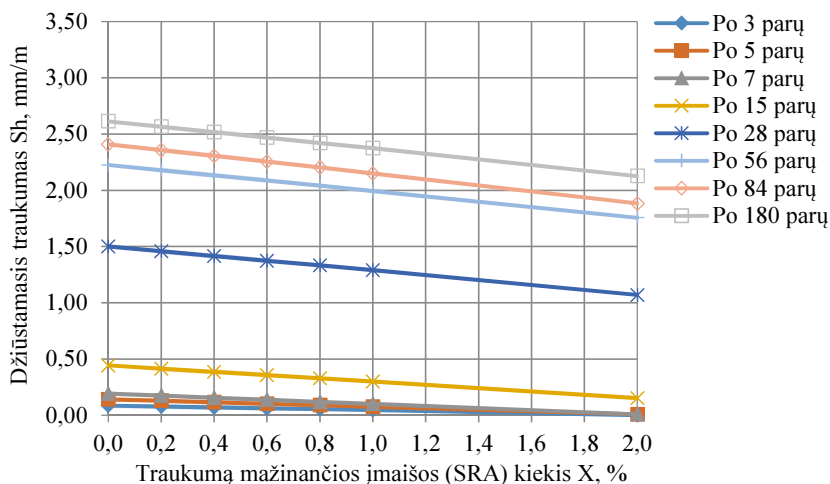
**Table 3.4.** Technological properties of cement mortars modified with a different amount of shrinkage reducing admixture (SRA)

Skiedinio žymuo	SRAsk0	SRAsk1	SRAsk2	SRAsk3	SRAsk4	SRAsk5	SRAsk6
SRA X, %	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	2,0
V/C	0,52						
Mišinio tankis $q_{miš}$ , kg/m <sup>3</sup>	2275	2279	2277	2280	2278	2281	2276
Sklidumas Sk, cm	12,0	12,0	12,5	12,5	13,0	13,0	14,0

3.4 lentelėje matoma, kad didinant SRA kiekį nuo 0 iki 2,0 % cemento masės, modifikuoto cementinio skiedinio konsistencija (sklidumas) didėja nuo 12,0 iki 14,0 cm, o jo tankis išlieka pastovus.

3.36 paveiksle matoma, kad cementinių skiedinių džiūstamasis traukumas priklauso nuo SRA kiekio bei jų kietėjimo trukmės.

Nustatyta, kad didinant SRA kiekį nuo 0 iki 1,0 % cemento masės, modifikuotų skiedinių džiūstamasis traukumas tolygiai mažėja nuo 1,50 iki 1,29 mm/m ir nuo 2,61 iki 2,37 mm/m, atitinkamai – po 28 ir 180 kietėjimo parų (3.36 pav.). Toliau didinant SRA kiekį iki 2,0 %, skiedinių džiūstamasis traukumas mažėja iki 1,07 mm/m – po 28 parų ir iki 2,12 mm/m – po 180 parų.



**3.36 pav.** Cementinių skiedinių džiūstamojo traukumo priklausomybė nuo traukumą mažinančios įmaišos (SRA) kiekio

**Fig. 3.36.** Dependence of drying shrinkage of cement mortars on the amount of the shrinkage reducing admixture (SRA)

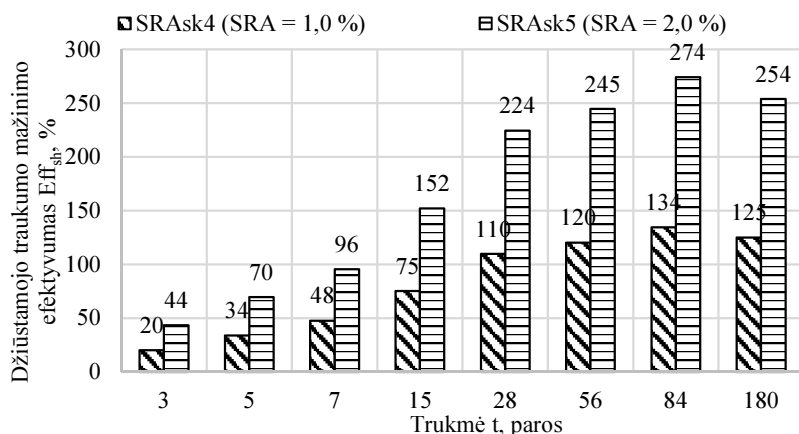
Esant skirtingai kietėjimo trukmei, SRA efektyvumas mažinti cementinių mišinių džiūstamąjį traukumą apskaičiuojamas pagal (3.2) formulę:

$$Eff_{sh_i} = \frac{Sh_{0,i} - Sh_i}{Sh_{0,i*}} \cdot 100, \quad (3.2)$$

čia  $Eff_{sh_i}$  – traukumą mažinančių įmaišų efektyvumas mažinti cementinių mišinių džiūstamąjį traukumą per  $i$  kietėjimo parų, %;  $Sh_{0,i}$  – cementinių mišinių be traukumą mažinančių įmaišų džiūstamojo traukumo deformacija po  $i$  kietėjimo parų, mm/m;  $Sh_i$  – modifikuotų traukumą mažinančiomis įmaišomis cementinių mišinių džiūstamojo traukumo deformacija po  $i$  kietėjimo parų, mm/m;  $Sh_{0,i*}$  – cementinių mišinių be traukumą mažinančių įmaišų džiūstamojo traukumo deformacija po  $i^*$  kietėjimo parų, mm/m.

Ilgėjant kietėjimo trukmei, SRA efektyvumas mažinti cementinio skiedinio džiūstamąjį traukumą vertinamas pagal skiedinio be SRA traukumo reikšmę, laikant ją atskaitos tašku, po  $i^*$  kietėjimo parų. Pažymėtina, kad šiam tyrimui suformuoti bandiniai buvo kietinami 7 paras polietileno plėvelėje. Žinoma, kad polietileno plėvelė sulaiko vandens garavimą iš bandinių. Todėl siekiant įvertinti tik SRA efektyvumą, išvengiant persidengiančių procesų poveikio skiedinių džiūstamajam traukumui, buvo parinktas atitinkamas atskaitos taškas – po 7 kietėjimo parų.

3.37 paveiksle pateiktas SRA efektyvumas mažinti cementinių skiedinių džiūstamąjį traukumą, esant skirtingai jų kietėjimo trukmei.



**3.37 pav.** Traukumą mažinančios įmaišos (SRA) efektyvumas mažinti džiūstamąjį traukumą esant skirtingai cementinių skiedinių kietėjimo trukmei

**Fig. 3.37.** Shrinkage reducing admixture (SRA) efficiency to reduce the drying shrinkage with different curing times of cement mortars

Nustatyta, kad ilgėjant kietėjimo trukmei iki 84 parų, traukumą mažinančios įmaišos efektyvumas mažinti cementinių skiedinių džiūstamąjį traukumą didėja: esant 1,0 % cemento masės SRA mažina traukumą iki 134 %, o 2,0 % – iki 274 % (3.37 pav.). Toliau ilgėjant kietėjimo trukmei iki 180 parų, SRA efektyvumas nežymiai mažėja.

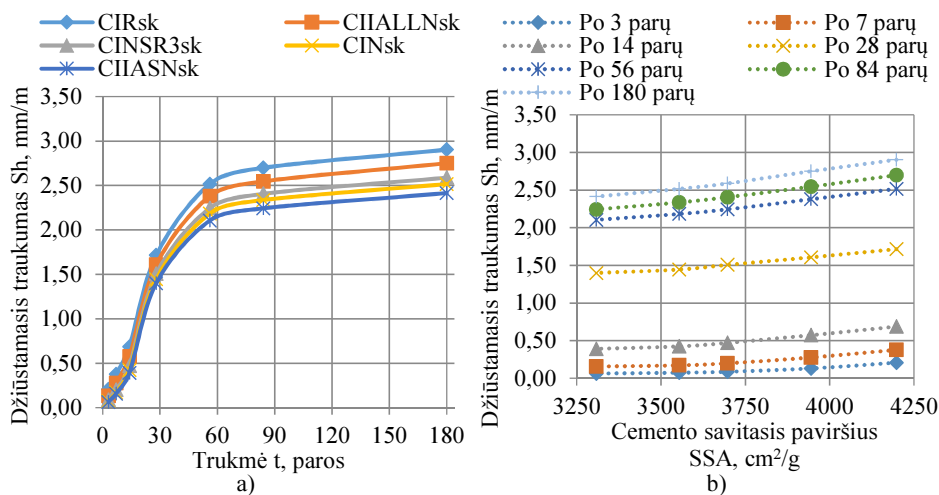
### 3.5.5. Skirtingo tipo cemento poveikis cementinių skiedinių džiūstamajam traukumui

Nustatytas skirtingo tipo cemento poveikis cementinių skiedinių džiūstamajam traukumui, esant skirtingai jų kietėjimo trukmei (3.38 pav.), ir cementinių skiedinių su skirtingo tipo cementu technologinės savybės (3.5 lentelė).

**3.5 lentelė.** Cementinių skiedinių su skirtingo tipo cementu technologinės savybės

**Table 3.5.** Technological properties of cement mortars with a cement of a different type

Skiedinio žymuo	CIRsk	CINSR3sk	CINsk	CIHASNsk	CIALLNsk
Cemento tipas	CIR	CINSR3	CIN	CIIASN	CIALLN
V/C	0,53				
Mišinio tankis $q_{miš.}$ , kg/m <sup>3</sup>	2236	2232	2230	2224	2228
Sklidumas Sk, cm	11,5	12,0	12,5	12,0	11,5



**3.38 pav.** Cementinių skiedinių džiūstamojo traukumo priklausomybė: a) nuo kietėjimo trukmės; b) nuo cemento savitojo paviršiaus

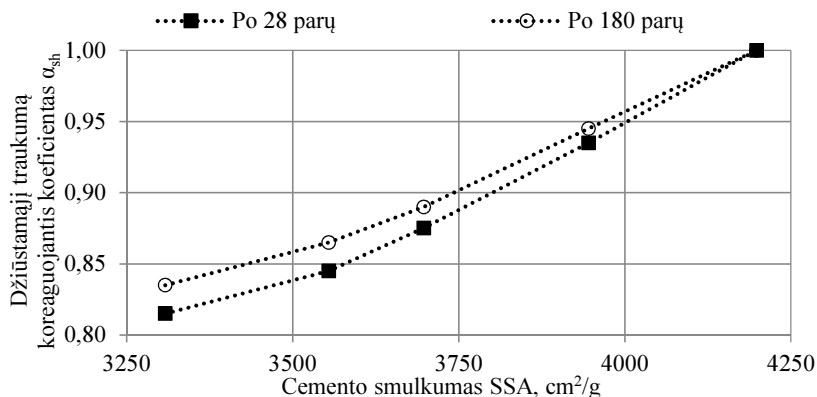
**Fig. 3.38.** Dependence of drying shrinkage of cement mortars: a) on the duration of curing; b) on the specific surface area of the cement

3.5 lentelėje matoma, kad cementinių skiedinių su portlandcemenčiu (CEM I 42,5 N, R ar N SR3) tankis nežymiai skiriasi nuo skiedinių su sudėtinio šlakiniu (CEM II/A-S 42,5 N) ar klinties (CEM II/A-LL 42,5 N) portlandcemenčiu tankio. Pažymėtina, kad sudėtinio šlakinio ar klinties portlandcemenčio klinkerio dalis (17 %) yra pakeista atitinkamai granuliuotu aukštakrosnių šlaku ar klintimis, o portlandcementis CEM I 42,5 N SR3 yra su sumažintu  $C_3A$  kiekiu.

Nustatyta, kad didžiausiu džiūstamuoju traukumu pasižymi skiediniai su portlandcemenčiu CEM I 42,5 R, kurio savitasis paviršius (4198 cm<sup>2</sup>/g) yra didžiausias, palyginti su kitų cementų savituoju paviršiumi: CEM I 42,5 N (3554 cm<sup>2</sup>/g), CEM I 42,5 N SR3 (3697 cm<sup>2</sup>/g), CEM II/A-S 42,5 N (3308 cm<sup>2</sup>/g) ar CEM II/A-LL 42,5 N (3945 cm<sup>2</sup>/g) (3.38 pav. a).

3.38 a paveiksle matoma, kad pakeitus portlandcemenčio klinkerio dalį iki 17 % granuliuotu aukštakrosnių šlaku, cementinių skiedinių džiūstamasis traukumas nežymiai skiriasi nuo skiedinių traukumo, kuriuose buvo naudotas panašaus smulkumo (savitojo paviršiaus) portlandcementis CEM I 42,5 N ar CEM I 42,5 N SR3 (su sumažintu  $C_3A$  kiekiu). Be to, pakeitus portlandcemenčio klinkerio dalį iki 17 % klintimis, skiedinių traukumas taip pat nežymiai skiriasi nuo skiedinių traukumo, kuriuose buvo naudotas panašaus smulkumo portlandcementis CEM I 42,5 R. Todėl skiedinių su skirtingo tipo cementu džiūstamasis traukumas vertintas pagal jo savitąjį paviršių (3.38 pav. b).

Nustatyta, kad didėjant cemento savitajam paviršiui nuo 3308 iki 3697  $\text{cm}^2/\text{g}$ , cementinių skiedinių džiūstamasis traukumas nežymiai didėja nuo 1,40 iki 1,50  $\text{mm}/\text{m}$  ir nuo 2,41 iki 2,58  $\text{mm}/\text{m}$ , atitinkamai – po 28 ir 180 kietėjimo parų (3.38 pav. b). Toliau didėjant cemento savitajam paviršiui iki 4198  $\text{cm}^2/\text{g}$ , skiedinių džiūstamasis traukumas intensyviai didėja iki 1,72  $\text{mm}/\text{m}$  – po 28 parų ir iki 2,90  $\text{mm}/\text{m}$  – po 180 parų.



**3.39 pav.** Diagrama cementinių mišinių džiūstamąjį traukumą koreguojančiam koeficientui nustatyti po 28 ir 180 kietėjimo parų

**Fig. 3.39.** Diagram to determine the adjusting coefficient of the drying shrinkage of the cement mixtures after 28 and 180 days of curing

Siekiant įvertinti cementinių mišinių džiūstamojo traukumo priklausomybę nuo skirtingo cemento savitojo paviršiaus, 3.39 paveiksle pateikta diagrama traukumą koreguojančiam koeficientui ( $\alpha_{sh}$ ) parinkti.

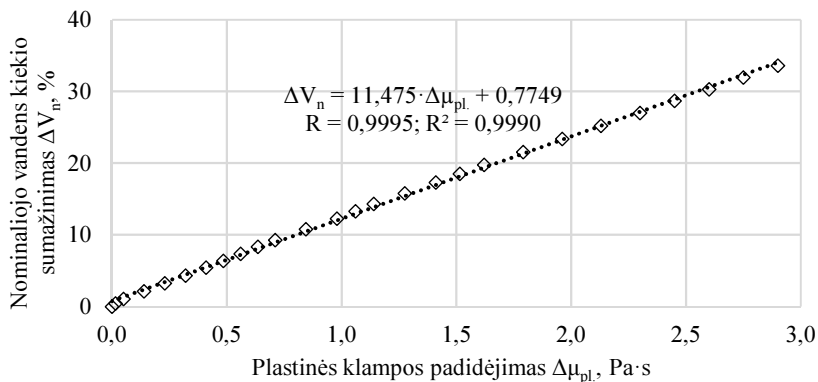
Koeficientas  $\alpha_{sh}$  gautas apskaičiavus iš 3.38 b paveikslo skiedinių su cementu (CEM I 42,5 N, CEM I 42,5 N SR3, CEM II/A-S 42,5 N ar CEM II/A-LL 42,5 N) ir skiedinių su portlandcemenčiu (CEM I 42,5 R) džiūstamojo traukumo santykį po 28 ar 180 kietėjimo parų.

### 3.6. Cheminių įmaišų ir mineralinių priedų poveikis projektinių technologinių savybių cementinių mišinių džiūstamajam traukumui

Siekiant įvertinti cheminių įmaišų (LS, MAP, PCE, AEA, SG, CN, VMA ir SRA) ir mineralinių priedų (GGBFS, FA ir SF) poveikį projektinių technologinių savybių cementinių mišinių džiūstamajam traukumui, pirmiausia ištirtas jų



plastifikavimo efektyvumas (3.26–3.32 pav.). Esant skirtingam cheminių įmaišų ir mineralinių priedų plastifikavimo efektyvumui, eksperimentiškai nustatytas vandens poreikio pokytis vienodo klampumo mišiniams gauti (3.26–3.32 pav.). Išanalizavus gautus duomenis (3.4, 3.6 b–3.11 b ir 3.26–3.32 pav.) gauta tiesinė priklausomybė tarp vandens poreikio ir portlandcemenčio tešlos plastinės klampos pokyčių (3.40 pav.).



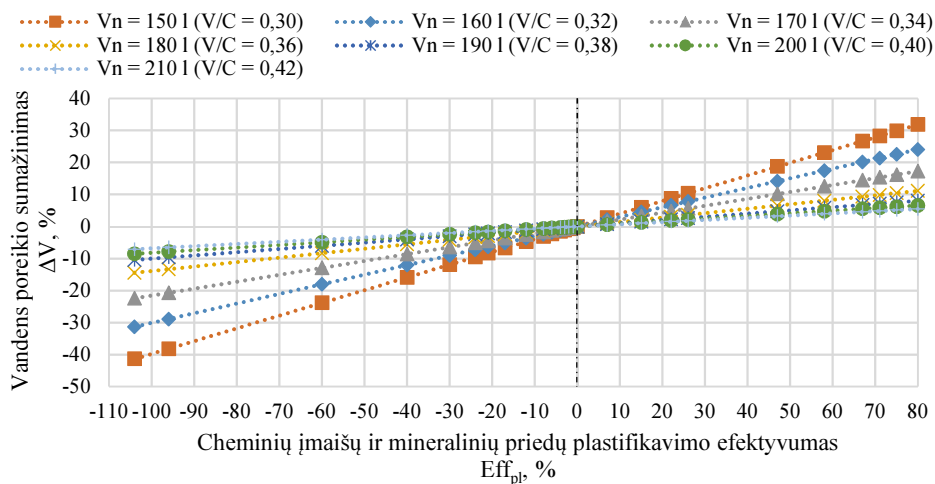
**3.40 pav.** Vandens poreikio sumažinimo priklausomybė nuo portlandcemenčio tešlos plastinės klampos padidėjimo

**Fig. 3.40.** Dependence of reduction in water demand on the increase of the plastic viscosity of the Portland cement paste

Cheminių įmaišų ir mineralinių priedų plastifikavimo efektyvumo poveikis vandens poreikio mišinyje pokyčiui, esant skirtingam nominaliajam vandens kiekiui (V/C santykiui), nustatomas interpoliuojant plastifikuotų superplastikliu (PCE) portlandcemenčio tešlą plastinės klampos (3.5 pav.) pokyčio reikšmes pagal gautą tiesinę priklausomybę tarp vandens poreikio ir tešlos plastinės klampos pokyčių (3.40 pav.). Pažymėtina, kad tešlų nominalusis vandens kiekis kito nuo 150 iki 210 l/m<sup>3</sup>, o V/C santykis, atitinkamai, nuo 0,30 iki 0,42 (intervalo žingsnio dydis – 0,2).

Nustačius cheminių įmaišų ir mineralinių priedų plastifikavimo efektyvumą ir jo poveikį vandens poreikio pokyčiui vienodo klampumo mišiniuose, esant skirtingam nominaliajam vandens kiekiui, gauta diagrama (3.41 pav.).

Ištirta, kad vandens poreikio sumažinimo dydis vienodo klampumo mišiniams gauti priklauso nuo nominaliojo vandens kiekio mišinyje. Esant mažam nominaliajam vandens kiekiui (150 l/m<sup>3</sup>) standžiuose mišiniuose, vandens poreikio sumažinimas, kai plastifikavimo efektyvumas yra 80 %, siekia 32 %, o esant dideliame nominaliajam vandens kiekiui (210 l/m<sup>3</sup>) takiuose mišiniuose – 6 % (3.41 pav.).



**3.41 pav.** Diagrama vienodo klampumo mišinių vandens poreikio pokyčiui nustatyti esant skirtingam nominaliajam vandens kiekiui (V/C santykiui)

**Fig. 3.41.** Diagram to determine the change in water demand in cement mixtures with identical viscosity when nominal water content differs (W/C ratio)

Išanalizavus gautus rezultatus (3.41 pav.) išvesta (3.3) empirinė lygtis vienodo klampumo mišinių vandens poreikio pokyčiui nustatyti, esant skirtingam cheminių įmaišų ir mineralinių priedų plastifikavimo efektyvumui bei nominaliam vandens kiekiui (V/C santykiui).

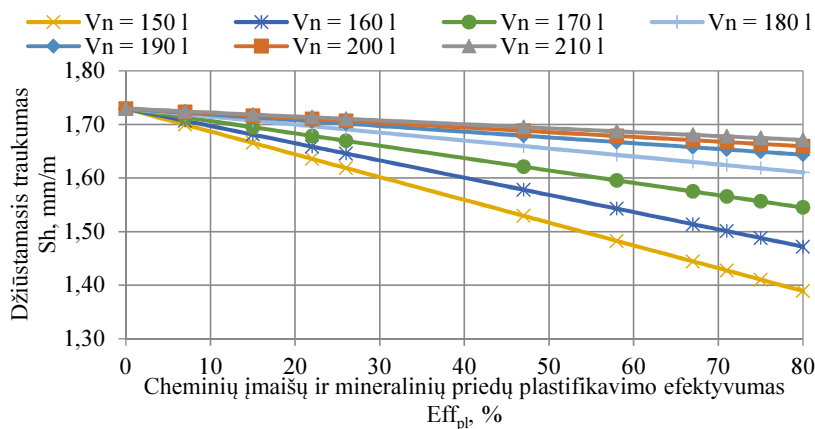
$$\Delta V = (98362 \cdot 10^{-9} \cdot V_n^2 - 40915 \cdot 10^{-6} \cdot V_n + 4,3248) \cdot Eff_{pl}, \quad (3.3)$$

čia  $\Delta V$  – vandens poreikio mišinyje pokytis, %;  $V_n$  – nominalusis vandens kiekis mišinyje;  $Eff_{pl}$  – cheminių įmaišų ir mineralinių priedų plastifikavimo efektyvumas, %.

Galima nustatyti cementinių mišinių džiūstamąjį traukumą po 28 ir 180 kietėjimo parų. Nustatymo rezultatai pateikti diagramose (3.42 ir 3.43 pav.).

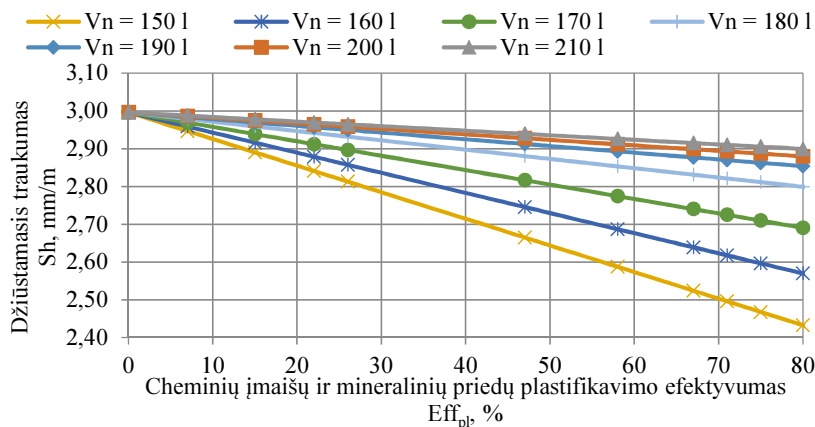
Diagramos (3.42 ir 3.43 pav.) gautos nustačius skiedinių džiūstamojo traukumo priklausomybę nuo vandens poreikio pokyčio (3.33 pav.) ir vandens poreikio pokyčio priklausomybę nuo cheminių įmaišų ir mineralinių priedų plastifikavimo efektyvumo (3.41 pav.).

Nustatyta, kad didėjant cheminių įmaišų ir mineralinių priedų plastifikavimo efektyvumui, mažėja vandens poreikis to paties klampumo mišiniams paruošti (3.41 pav.), kurio poveikis lemia mažėjantį cementinių mišinių džiūstamąjį traukumą, esant skirtingai jų kietėjimo trukmei (3.42 ir 3.43 pav.).



**3.42 pav.** Diagrama cementinių mišinių džiūstamajam traukumui nustatyti po 28 kietėjimo parų

**Fig. 3.42.** Diagram to determine the drying shrinkage of the cement mixtures after 28 days of curing



**3.43 pav.** Diagrama cementinių mišinių džiūstamajam traukumui nustatyti po 180 kietėjimo parų

**Fig. 3.43.** Diagram to determine the drying shrinkage of the cement mixtures after 180 days of curing

Pažymėtina, kad didinant klampą modifikuojančios įmaišos, granuliuto aukštakrosnių šlako ar SiO<sub>2</sub> mikrodulkių kiekį cementiniuose mišiniuose, jų plastifikavimo efektyvumas mažėja (3.29, 3.31 a, 3.32 pav.). Tam, kad būtų išlaikomas pastovus arba sumažintas vandens poreikis mišiniuose, naudojamos plastifikuojančios cheminės įmaišos, kurios efektyviai padidina plastifikavimo

efektyvumą. Todėl pateiktose diagramose (3.42 ir 3.43 pav.) galima nustatyti cementinių mišinių džiūstamąjį traukumą tik esant teigiamam cheminių įmaišų ir mineralinių priedų plastifikavimo efektyvumui.

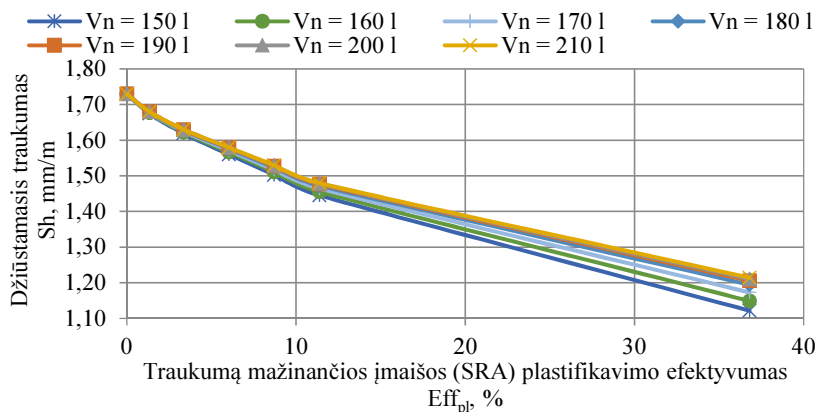
Išanalizavus gautus rezultatus (3.39, 3.42 ir 3.43 pav.) išvestos (3.4) ir (3.5) empirinės lygtys nustatyti cementinių mišinių džiūstamąjį traukumą, esant skirtingam nominaliajam vandens kiekiui bei cemento smulkumui, atitinkamai, po 28 ar 180 kietėjimo parų.

$$Sh_{28} = \left( (-1052 \cdot 10^{-9} \cdot V_n^2 + 4378 \cdot 10^{-7} \cdot V_n - 4627 \cdot 10^{-5}) \cdot \right. \\ \left. Eff_{pl} + 1,730 \right) \cdot \alpha_{sh}, [R = 0,9999; R^2 = 0,9999]; \quad (3.4)$$

$$Sh_{180} = \left( (-1741 \cdot 10^{-9} \cdot V_n^2 + 7241 \cdot 10^{-7} \cdot V_n - 7655 \cdot 10^{-5}) \cdot \right. \\ \left. Eff_{pl} + 2,996 \right) \cdot \alpha_{sh}, [R = 0,9999; R^2 = 0,9999], \quad (3.5)$$

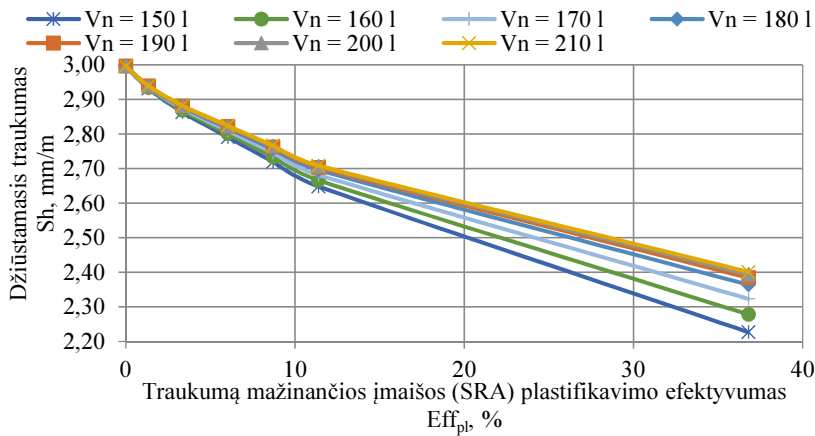
čia  $Sh_{28}$ ,  $Sh_{180}$  – cementinių mišinių džiūstamasis traukumas, atitinkamai po 28 ir 180 kietėjimo parų, mm/m;  $V_n$  – nominalusis vandens kiekis mišinyje, l;  $Eff_{pl}$  – cheminių įmaišų ir mineralinių priedų plastifikavimo efektyvumas, %;  $\alpha_{sh}$  – džiūstamąjį traukumą koreguojantis koeficientas (parenkamas iš 3.39 paveikslė pateiktos diagramos).

Traukumą mažinanti įmaiša ne tik mažina cementinių mišinių džiūstamąjį traukumą (3.36 pav.), bet ir pasižymi plastifikavimo efektyvumu (3.30 pav.). Todėl žinant SRA plastifikavimo efektyvumą, 3.44 bei 3.45 paveiksluose pateiktos diagramos modifikuotų SRA cementinių mišinių džiūstamajam traukumui nustatyti po 28 ir 180 kietėjimo parų.



**3.44 pav.** Diagrama SRA modifikuotų cementinių mišinių džiūstamajam traukumui nustatyti po 28 kietėjimo parų

**Fig. 3.44.** Diagram to determine the drying shrinkage of the cement mixtures modified with shrinkage reducing admixture (SRA) after 28 days of curing



**3.45 pav.** Diagrama SRA modifikuotų cementinių mišinių džiūstamajam traukumui nustatyti po 180 kietėjimo parų

**Fig. 3.45.** Diagram to determine the drying shrinkage of the cement mixtures modified with shrinkage reducing admixture (SRA) after 180 days of curing

Išanalizavus gautus rezultatus (3.39, 3.44 ir 3.45 pav.) išvestos (3.6) ir (3.7) empirinės lygtys nustatyti SRA modifikuotų cementinių mišinių džiūstamąjį traukumą, esant skirtingam nominaliajam vandens kiekiui ir cemento smulku-  
mui, atitinkamai, po 28 ar 180 kietėjimo parų. Pažymėtina, kad didinant SRA  
plastifikavimo efektyvumą iki 11 % cementinių mišinių džiūstamasis traukumas,  
esant skirtingam nominaliajam vandens kiekiui (nuo 150 iki 210 l/m<sup>3</sup>), mažėja  
panašiai (3.44 ir 3.45 pav.). Todėl (3.6) ir (3.7) lygtys taikomos, kai SRA plasti-  
fikavimo efektyvumas siekia ne mažiau kaip 11 %.

$$Sh_{28} = \left( (-68155 \cdot 10^{-11} \cdot V_n^2 + 28349 \cdot 10^{-8} \cdot V_n - 39946 \cdot 10^{-6}) \cdot Eff_{pl} - 25411 \cdot 10^{-10} \cdot V_n^2 + 10570 \cdot 10^{-7} \cdot V_n + 1,4887 \right) \cdot \alpha_{sh}, [R = 0,9999; R^2 = 0,9999]; \quad (3.6)$$

$$Sh_{180} = \left( (-13429 \cdot 10^{-10} \cdot V_n^2 + 55859 \cdot 10^{-8} \cdot V_n - 70210 \cdot 10^{-6}) \cdot Eff_{pl} - 27148 \cdot 10^{-10} \cdot V_n^2 + 11293 \cdot 10^{-7} \cdot V_n + 2,7289 \right) \cdot \alpha_{sh}, [R = 0,9999; R^2 = 0,9999], \quad (3.7)$$

čia  $Sh_{28}$ ,  $Sh_{180}$  – cementinių mišinių džiūstamasis traukumas, atitinkamai po 28 ir 180 kietėjimo parų, mm/m;  $V_n$  – nominalusis vandens kiekis mišinyje, l;  $Eff_{pl}$  – traukumą mažinančios įmaišos plastifikavimo efektyvumas, %;  $\alpha_{sh}$  – džiūstamąjį traukumą koreguojantis koeficientas (parenkamas iš 3.39 paveiksle pateiktos diagramos).

### 3.7. Trečiojo skyriaus išvados

1. Didėjant portlandcemenčio be mineralinių priedų dalelių tūrinei koncentracijai tešloje nuo 0,434 iki 0,518 (mažinant V/C nuo 0,42 iki 0,30), keičiasi jos reologinės savybės: pagal eksponentinę priklausomybę didėja ribiniai šlyties įtempiai nuo 7,1 iki 12,7 Pa ir plastinė klampa nuo 0,88 iki 4,30 Pa·s bei struktūros atsistatymo rodiklis, skirtas cementinių mišinių tiksotropiškumui įvertinti, nuo 977 iki 5291 Pa·min.
2. Cementinių mišinių plastifikavimo efektyvumas, kuris yra svarbus technologinis rodiklis betonavimo ir transportavimo technologiniuose procesuose, turi būti vertinamas klamos pokyčio procentais, įmaišius tam tikrą plastifikavimo efektą turinčios cheminės įmaišos ir (arba) mineralinio priedo kiekį.
3. Plastifikavimo efektyvumas priklauso nuo plastifikuojančios įmaišos cheminės sudėties ir kiekio. Plastiklis modifikuotų lignosulfonatų pagrindu iki 1,2 % cemento masės tolygiai didina plastifikavimo efektyvumą iki 34,7 %. Superplastiklis polikarboksilatų esterio ar modifikuotų akrilo polimerų pagrindu iki 0,8 % cemento masės intensyviai didina plastifikavimo efektyvumą – atitinkamai iki 71,9 ir 63,4 %, o tolesnis jo kiekio didinimas (iki 1,2 %) mažai keičia plastifikavimo efektyvumą.
4. Įtraukto oro kiekio didėjimas cementiniuose mišiniuose su orą įtraukiančios įmaišos (paviršių aktyvinančių medžiagų pagrindu) kiekiais iki 0,1 % cemento masės intensyviai padidina plastifikavimo efektyvumą iki 37,5 %, o tolesnis orą įtraukiančios įmaišos kiekio didinimas iki 0,2 % plastifikavimo efektyvumą padidina iki 51,6 %.
5. Rišimosi lėtiklis (natrio gliukonato pagrindu) iki 0,6 % cemento masės tolygiai didina plastifikavimo efektyvumą iki 11,1 %, o tolesnis jo kiekio didinimas (iki 1,2 %) mažai keičia plastifikavimo efektyvumą – didina iki 15 %. Rišimosi greitiklis (kalcio nitrato pagrindu) mažai keičia plastifikavimo efektyvumą, t. y. sumažina iki –3,4 %.
6. Klampą modifikuojanti įmaiša stambiamolekulinių kopolimerų pagrindu iki 2 % cemento masės neturi įtakos plastifikavimo efektyvumui. Tolesnis klampą modifikuojančios įmaišos didinimas intensyviai mažina plastifikavimo efektyvumą, ir esant 3,6 % kiekiui plastifikavimo efektyvumas sumažėja iki –21,1 %.
7. Betono traukumą mažinanti įmaiša (paviršių aktyvinančių medžiagų pagrindu) iki 1 % cemento masės padidina plastifikavimo efektyvumą iki 14,2 %, o tolesnis įmaišos kiekio didinimas intensyviai didina plastifikavimo efektyvumą ir esant 2,1 % kiekiui plastifikavimo efektyvumas padidėja iki 40,3 %.

8. Granuliuotas aukštakrosnių šlakas tolygiai mažina plastifikavimo efektyvumą – pakeitus portlandcemenčio klinkerio dalį 60 % šlaku, plastifikavimo efektyvumas sumažėja iki –104,4 %. Lakieji pelenai efektyviausiai didina plastifikavimo efektyvumą, pakeitus jais iki 30 % portlandcemenčio (plastifikavimo efektyvumas siekia 33,5 %), o tolesnis lakiųjų pelenų kiekio didinimas mažiau didina plastifikavimo efektyvumą ir esant 60 % pasiekia 46,6 % efektyvumą.  $\text{SiO}_2$  mikrodulkės intensyviai mažina plastifikavimo efektyvumą, pakeitus portlandcemenčio klinkerio dalį 10 % mikrodulkėmis, plastifikavimo efektyvumas sumažėja iki –39,3 %.
9. Plastifikavimo efektyvumas nepriklauso nuo nominaliojo vandens kiekio kintant jam nuo 150 iki 210 l/m<sup>3</sup> cementiniame mišinyje.
10. Cementinių mišinių džiūstamąjį traukumą nulemia nominalusis vandens kiekis juose ir cemento savitasis paviršius. Sumažėjus vandens poreikiui mišiniuose su plastifikuojančiomis įmaišomis iki 30 % jų traukumo deformacijos sumažėja apie 0,540 mm/m (18 %). Padidėjus cemento smulkumui nuo 3300 iki 4200 cm<sup>2</sup>/g, nepriklausomai nuo cemento tipo, cementinių mišinių traukumo deformacijos padidėja 0,490 mm/m (20 %).
11. Tešlos kiekis ir įtraukto oro kiekis cementiniuose mišiniuose neturi įtakos jų džiūstamajam traukumui.
12. Traukumą mažinančios įmaišos paviršių aktyvinančių medžiagų pagrindu (1 % kiekis) sumažina cementinių mišinių džiūstamąjį traukumą po 28, 84 ir 180 kietėjimo parų, atitinkamai – apie 110, 134 ir 125 %, o 2 % kiekis – apie 224, 274 ir 254 %.
13. Vandens poreikio sumažinimas vienodo klampumo cementiniams mišiniam gauti priklauso nuo nominaliojo vandens kiekio juose. Esant mažam nominaliajam vandens kiekiui (150 l/m<sup>3</sup>) standžiuose mišiniuose, vandens poreikio sumažinimas, kai plastifikavimo efektyvumas yra 80 %, siekia 32 %, o esant dideliame nominaliajam vandens kiekiui (210 l/m<sup>3</sup>) takiuose mišiniuose – 6 %.
14. Papildomas traukumą mažinančios įmaišos naudojimas turi įtakos ir cementinių mišinių džiūstamojo traukumo deformacijoms, ir plastifikavimo efektyvumui, kuris turi būti įvertinamas nustatant mišinių traukumą.





---

## Bendrosios išvados

1. Naudojant įvairias chemines įmaišas ir (arba) mineralinius priedus cementiniame mišinyje turi būti įvertinamas plastifikavimo efektyvumas ir struktūros atsistatymo rodiklis. Plastifikavimo efektyvumas nusako mišinio technologines charakteristikas ir lemia vandens poreikį mišinyje ir mišinio džiūstamojo traukumo deformacijas. Struktūros atsistatymo rodiklis įvertina mišinių klojumo charakteristikas, tankinimui naudojant vibravimą arba kitą mechaninį poveikį.
2. Portlandcemenčio be mineralinių priedų tešlos struktūros atsistatymo rodiklis, skirtas cementinių mišinių tiksotropiškumui įvertinti, didėja pagal eksponentinę priklausomybę nuo 977 iki 5291 Pa·min didėjant cemento dalelių tūrinei koncentracijai joje nuo 0,434 iki 0,518 (mažėjant V/C nuo 0,42 iki 0,30).
3. Cementinių mišinių plastifikavimo efektyvumą didina orą įtraukiančios įmaišos (paviršių aktyvinančių medžiagų pagrindu) iki 52 %, rišimosi lėtikliai (natrio gliukonato pagrindu) – iki 11 %, traukumą mažinančios įmaišos (paviršių aktyvinančių medžiagų pagrindu) – iki 40 %, lakieji pelenai – iki 47 %, o mažina rišimosi greitikliai (kalcio nitrato pagrindu) – iki 4 %, klampą modifikuojančios įmaišos (stambiamolekulinių kopolimerų pagrindu) – iki 21 %, granuluotas aukštakrosnių šlakas – iki 104 %, silicio dioksido mikrodulkės iki – 39 %.

4. Cementinių mišinių su plastifikuojančiomis įmaišomis džiūstamojo traukumo deformacijos tolygiai didėja iki 18 %, didėjant vandens poreikiui juose iki 30 %. Džiūstamojo traukumo deformacijos taip pat didėja iki 20 %, didėjant cemento smulkumui nuo 3300 iki 4200 cm<sup>2</sup>/g, nepriklausomai nuo cemento tipo. Cementinės tešlos kiekis ir įtraukto oro kiekis mišinyje neturi įtakos mišinių džiūstamajam traukumui.
5. Traukumą mažinančios įmaišos paviršių aktyvinančių medžiagų pagrindu, kai jų yra 1 % cemento masės, sumažina cementinių mišinių džiūstamąjį traukumą po 180 kietėjimo parų apie 125 %, o 2 % kiekis – apie 250 %.
6. Cementinių mišinių vandens poreikis vienodo klampumo mišiniams gauti priklauso nuo cheminių įmaišų ir (arba) mineralinių priedų plastifikavimo efektyvumo ir nominaliojo vandens kiekio mišiniuose. Esant mažam nominaliajam vandens kiekiui (150 l/m<sup>3</sup>) standžiuose mišiniuose, vandens poreikis sumažinamas iki 32 %, o dideliame nominaliajame vandens kiekiui (210 l/m<sup>3</sup>) tokiuose mišiniuose – vandens poreikis sumažinamas iki 6 %, kai įmaišų ir (arba) priedų plastifikavimo efektyvumas yra 80 %.
7. Cementinių mišinių džiūstamasis traukumas priklauso nuo cheminių įmaišų ir mineralinių priedų plastifikavimo efektyvumo. Mišinių traukumas po 180 kietėjimo parų tolygiai mažėja iki 19 %, plastifikavimo efektyvumui didėjant iki 80 %.
8. Pagal gautus plastifikavimo efektyvumo rezultatus, galima nustatyti standžiųjų ir takųjų cementinių mišinių su skirtingomis cheminėmis įmaišomis, mineraliniais priedais bei skirtingo smulkumo cementais džiūstamojo traukumo deformacijas jų kietėjimo metu.

---

## Literatūra ir šaltiniai

- Ahari, R. S.; Erdem, T. K.; Ramyar, K. 2015a. Time-dependent rheological characteristics of self-consolidating concrete containing various mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 88, 134–142.
- Ahari, R. S.; Erdem, T. K.; Ramyar, K. 2015b. Thixotropy and structural breakdown properties of self consolidating concrete containing various supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 59, 26–37.
- Aïtcin, P. C. 2016a. Retarders. In *Science and Technology of Concrete Admixtures*, Woodhead Publishing, pp. 395–404.
- Alsadey, S. 2015. Effect of superplasticizer on fresh and hardened properties of concrete. *Journal of Agricultural Science and Engineering*, 1(2), 70–74.
- American Concrete Institute 209. 2008. *Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures*, ACI Committee 209 Report, ACI 209R-92, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI. 47 pp.
- American Concrete Institute 212. 2016. *Reports on chemical admixtures for concrete*. ACI Committee 212 Report, ACI 212.3R-16, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI. 76 pp.
- Asghari, A. A.; Hernandez, A. M. L.; Feys, D.; De Schutter, G. 2016. Which parameters, other than the water content, influence the robustness of cement paste with SCC consistency?, *Construction and Building Materials*, 124, 95–103.
- Assaad, J.; Khayat, K. H.; Mesbah, H. 2003. Assessment of thixotropy of flowable and self-consolidating concrete. *Materials Journal*, 100(2), 99–107.

Barbosa, W.; Ramalho, R. P.; Portella, K. F. 2018. Influence of gypsum fineness in the first hours of cement paste: Hydration kinetics and rheological behaviour. *Construction and Building Materials*, 184, 304–310.

Benaicha, M.; Roguiez, X.; Jalbaud, O.; Burtshell, Y.; Alaoui, A. H. 2015. Influence of silica fume and viscosity modifying agent on the mechanical and rheological behavior of self compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 84, 103–110.

Bennett, E. W.; Loat, D. R. 1970. Shrinkage and creep of concrete as affected by the fineness of Portland cement, *Mag. Concr. Res.*, 22(71), pp. 69–78.

Bentz, D. P. 2005. Curing with shrinkage-reducing admixtures. *Concrete international*, 27(10), 55–60.

Bentz, D. P.; Ferraris, C. F.; Galler, M. A.; Hansen, A. S.; Guynn, J. M. 2012. Influence of particle size distributions on yield stress and viscosity of cement–fly ash pastes. *Cement and Concrete Research*, 42(2), 404–409.

Bentz, D. P.; Geiker, M. R.; Hansen, K. K. 2001. Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement pastes and mortars. *Cement and concrete research*, 31(7), 1075–1085.

Berger, R. L.; McGregor, J. D. 1972. Influence of admixtures on the morphology of calcium hydroxide formed during tricalcium silicate hydration. *Cement and Concrete Research*, 2(1), 43–55.

Bessaies-Bey, H.; Palacios, M.; Pustovgar, E.; Hanafi, M.; Baumann, R.; Flatt, R. J.; Roussel, N. 2018. Non-adsorbing polymers and yield stress of cement paste: Effect of depletion forces. *Cement and Concrete Research*, 111, 209–217.

Beycioğlu, A.; Aruntaş, H. Y. 2014. Workability and mechanical properties of self-compacting concretes containing LLFA, GBFS and MC. *Construction and building materials*, 73, 626–635.

Bogas, J. A.; Nogueira, R.; Almeida, N. G. 2014. Influence of mineral additions and different compositional parameters on the shrinkage of structural expanded clay lightweight concrete. *Materials & Design (1980-2015)*, 56, 1039–1048.

Boukendakdji, O.; Kadri, E. H.; Kenai, S. 2012. Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete. *Cement and concrete composites*, 34(4), 583–590.

Bouras, R.; Kaci, A.; Chaouche, M. 2012. Influence of viscosity modifying admixtures on the rheological behavior of cement and mortar pastes. *Korea-Australia Rheology Journal*, 24(1), 35–44.

Brooks, J. J. 1989. Influence of mix proportions, plasticizers and superplasticizers on creep and drying shrinkage of concrete. *Magazine of concrete research*, 41(148), 145–153.

Brumaud, C.; Baumann, R.; Schmitz, M.; Radler, M.; Roussel, N. 2014. Cellulose ethers and yield stress of cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 55, 14–21.

Cao, M. L.; Zhang, C.; Han, L. D. 2012. Experimental study on the rheological properties of fresh mineral powder concrete based on two-point method. *Hunningtu (Concrete)*, (1), 138–141.

- Carlswärd, J.; Emborg, M.; Utsi, S.; Oberg, P. 2003. Effect of constituents on the workability and rheology of self-compacting concrete. In *Proceeding of the Third international RILEM conference on SCC, Island, Proceedings PRO* (Vol. 33, pp. 143–153).
- Chindaprasirt, P.; Homwuttiwong, S.; Sirivivatnanon, V. 2004. Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar, *Cement and Concrete Research*, 34, 1087–1092.
- Combrinck, R.; Boshoff, W. P. 2013. Typical plastic shrinkage cracking behaviour of concrete, *Magazine of Concrete Research*, 65(8), 486–493.
- Corinaldesi, V. 2012. Combined effect of expansive, shrinkage reducing and hydrophobic admixtures for durable self compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 36, 758–764.
- Cyr, M.; Legrand, C.; Mouret, M. 2000. Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives. *Cement and Concrete Research*, 30(9), 1477–1483.
- Daukšys, M.; Klovas, A.; Vaičiukynienė, D. 2018. The Influence of Fine Particle Content (Cement together with Sand Particles up to 0.25 mm) on Rheological Properties of Concrete Mixture. In *Solid State Phenomena*, 276, pp. 97–102. Trans Tech Publications.
- Daukšys, M.; Skripkiūnas, G. 2015. Investigation of dilatancy mechanism of Portland cement paste. *Construction and Building Materials*, 83, 53–61.
- Daukšys, M.; Skripkiūnas, G. 2018. Testing of Rheological Properties of Concrete Mixtures Using a Special Vibroviscometer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(7), 1–8 pp.
- Daukšys, M.; Skripkiūnas, G.; Grinys, A. 2010. Finely ground quartz sand and plasticizing admixtures influence on rheological properties of portland cement paste. *Materials Science*, 16(4), 365–372.
- Dellinghausen, L.M.; Gastaldini, A.L.G.; Vanzin, F.J.; Veiga, K.K. 2012. Total shrinkage, oxygen permeability, and chloride ion penetration in concrete made with white portland cement and blast-furnace slag, *Construction and Building Materials*, 37, 652–659.
- Derabla, R.; Benmalek, M. L. 2014. Characterization of heat-treated self-compacting concrete containing mineral admixtures at early age and in the long term. *Construction and Building Materials*, 66, 787–794.
- Dils, J.; Boel, V.; De Schutter, G. 2013. Influence of cement type and mixing pressure on air content, rheology and mechanical properties of UHPC. *Construction and Building Materials*, 41, 455–463.
- Dönmez, A.; Bažant, Z. P. 2016. Shape factors for concrete shrinkage and drying creep in model B4 refined by nonlinear diffusion analysis. *Materials and Structures*, 49(11), 4779–4784.
- Ducloué, L.; Pitois, O.; Goyon, J.; Chateau, X.; Ovarlez, G. 2015. Rheological behaviour of suspensions of bubbles in yield stress fluids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 215, 31–39.

Eberhardt, A. B. 2011. *On the Mechanisms of Shrinkage Reducing Admixtures in Self Consolidating Mortars and Concretes*. Ph.D. Thesis, Bauhaus Universität Weimar, Weimar, Germany. 286 pp.

Eberhardt, A. B.; Flatt, R. J. 2016. Working mechanisms of shrinkage-reducing admixtures. In *Science and Technology of Concrete Admixtures* (pp. 305–320). Woodhead Publishing.

Erzengin, S. G.; Kaya, K.; Özkorucuklu, S. P.; Özdemir, V.; Yıldırım, G. 2018. The properties of cement systems superplasticized with methacrylic ester-based polycarboxylates. *Construction and Building Materials*, 166, 96–109.

Ezziane, K.; Ngo, T. T.; Kaci, A. 2014. Evaluation of rheological parameters of mortar containing various amounts of mineral addition with polycarboxylate superplasticizer. *Construction and Building Materials*, 70, 549–559.

Fernandez, N. 2015. *From tribology to rheology: Impact of interparticle friction in the shear thickening of non-Brownian suspensions* (Doctoral dissertation, ETH Zurich).

Fernandez, N.; Mani, R.; Rinaldi, D.; Kadau, D.; Mosquet, M.; Lombois-Burger, H.; Cayer-Barrioz, J.; Herrmann, H.; Spencer, N.; Isa, L. 2013. Microscopic mechanism for shear thickening of non-Brownian suspensions. *Physical review letters*, 111(10), 108301.

Feys, D.; Asghari, A. 2019. Influence of maximum applied shear rate on the measured rheological properties of flowable cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 117, 69–81.

Feys, D.; Cepuritis, R.; Jacobsen, S.; Lesage, K.; Secrieru, E.; Yahia, A. 2018. Measuring rheological properties of cement pastes: most common techniques, procedures and challenges. *RILEM technical letters*, 2, 129–135.

Feys, D.; Verhoeven, R.; De Schutter, G. 2009. Why is fresh self-compacting concrete shear thickening?, *Cement and concrete Research*, 39(6), 510–523.

Flatt, R. J.; Bowen, P. 2006. Yodel: a yield stress model for suspensions. *Journal of the American Ceramic Society*, 89(4), 1244–1256.

Galicía-Aldama, E.; Mayorga, M.; Arteaga-Arcos, J. C.; Romero-Salazar, L. 2019. Rheological behaviour of cement paste added with natural fibres. *Construction and Building Materials*, 198, 148–157.

Gedam, B.A.; Bhandari, N.M.; Upadhyay, A. 2015. Influence of supplementary cementitious materials on shrinkage, creep, and durability of high-performance concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(4), 04015173, pp. 1–11.

Gettu, R.; Roncero, J. 2005. On the long term response of concrete with a shrinkage reducing admixture. In *Admixtures-Enhancing Concrete Performance: Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK on 6 July 2005*. Thomas Telford Publishing. pp. 209–216.

González-Taboada, I.; González-Fonteboa, B.; Martínez-Abella, F.; Seara-Paz, S. 2018. Thixotropy and interlayer bond strength of self-compacting recycled concrete. *Construction and Building Materials*, 161, 479–488.

- Goto, T.; Sato, T.; Sakai, K.; Ii, M. 1985. *U.S. Patent No. 4547223*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Guo, S.; Zhang, Y.; Wang, K.; Bu, Y.; Wang, C.; Ma, C.; Liu, H. 2019. Delaying the hydration of Portland cement by sodium silicate: Setting time and retarding mechanism. *Construction and Building Materials*, 205, 543–548.
- Hafid, H.; Ovarlez, G.; Toussaint, F.; Jezequel, P. H.; Roussel, N. 2015. Assessment of potential concrete and mortar rheometry artifacts using magnetic resonance imaging. *Cement and Concrete Research*, 71, 29–35.
- Hajibabae, A.; Ley, M. T. 2015. Impact of Wet and Sealed Curing on Curling in Cement Paste Beams from Drying Shrinkage. *ACI Materials Journal*, 112(1), 1–6 pp.
- Hajibabae, A.; Ley, M. T. 2016. The impact of wet curing on curling in concrete caused by drying shrinkage. *Materials and Structures*, 49(5), 1629–1639.
- Han, D.; Ferron, R. D. 2016. Influence of high mixing intensity on rheology, hydration, and microstructure of fresh state cement paste. *Cement and Concrete Research*, 84, 95–106.
- Han, D.; Ferron, R. D. 2017. Effect of Mixing Speed on Rheology of Superplasticized Portland Cement and Limestone Powder Pastes. *ACI Materials Journal*, 114(4), 559–569 pp.
- Hansen, T. C. 1966. Effect of wind on creep and drying shrinkage of hardened cement mortar and concrete, *ASTM Mat. Res. & Stand.*, 6, pp. 16–19.
- Hansen, T. C.; Mattock, A. H. 1966. The influence of size and shape of member on the shrinkage and creep of concrete, *J. Amer. Concr. Inst.*, 63, pp. 267–290.
- Hansen, W.; Almudaiheem, J. A. 1987. Ultimate drying shrinkage of concrete – influence of major parameters. *ACI Materials Journal*, 84(3), 217–223.
- He, Z. M.; Liu, J. Z.; Wang, T. H. 2011. Influence of Air Entraining Agent on Performance of Inorganic Thermal Insulating Mortar, In *Applied Mechanics and Materials*, 71, Trans Tech Publications, pp. 490–493.
- He, Z.; Li, Z. J.; Chen, M. Z.; Liang, W. Q. 2006. Properties of shrinkage-reducing admixture-modified pastes and mortar. *Materials and structures*, 39(4), 445–453.
- Hobbs, D. W. 1977. Influence of specimen geometry upon weight change and shrinkage of air-dried concrete specimens, *Mag. Concr. Res.*, 29(99), pp. 70–80.
- Hot, J.; Bessaies-Bey, H.; Brumaud, C.; Duc, M.; Castella, C.; Roussel, N. 2014. Adsorbing polymers and viscosity of cement pastes. *Cement and concrete research*, 63, 12–19.
- Hu, X.; Shi, Z.; Shi, C.; Wu, Z.; Tong, B.; Ou, Z.; De Schutter, G. 2017. Drying shrinkage and cracking resistance of concrete made with ternary cementitious components, *Construction and Building Materials*, 149, 406–415.
- Hua, A. I.; Young, J. F. 1997. Mechanism of shrinkage reduction using a chemical admixture. In *Proceedings of the 10th International Conference on the Chemistry of Cement* (Vol. 3, pp. 18–22). Gfteborg, Sweden.

Itim, A.; Ezziane, K.; Kadri, E.-H. 2011. Compressive strength and shrinkage of mortar containing various amounts of mineral additions, *Construction and Building Materials*, 25, 3603–3609.

Jiao, D.; Shi, C.; Yuan, Q. 2018. Influences of shear-mixing rate and fly ash on rheological behavior of cement pastes under continuous mixing. *Construction and Building Materials*, 188, 170–177.

Jiao, D.; Shi, C.; Yuan, Q.; An, X.; Liu, Y.; Li, H. 2017. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review. *Cement and Concrete Composites*, 83, 146–159.

Juilland, P.; Kumar, A.; Gallucci, E.; Flatt, R. J.; Scrivener, K. L. 2012. Effect of mixing on the early hydration of alite and OPC systems. *Cement and Concrete Research*, 42(9), 1175–1188.

Justnes, H.; Petersen, B. G. 2002. Counteracting Plasticizer Retardation of Cement Setting with Calcium Nitrate. In *Int. Conf. Innovations and Developments in Concrete Materials and Construction*, 9, pp. 259–267.

Kabagire, K. D.; Diederich, P.; Yahia, A.; Chekired, M. 2017. Experimental assessment of the effect of particle characteristics on rheological properties of model mortar. *Construction and Building Materials*, 151, 615–624.

Kabagire, K. D.; Yahia, A.; Chekired, M. 2019. Toward the prediction of rheological properties of self-consolidating concrete as diphasic material. *Construction and Building Materials*, 195, 600–612.

Kinoshita, M.; Saitou, K.; Tamaki, S.; Iida, M. 2007. *U.S. Patent No. 7265191*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Klovas, A. 2016. *Reologinių betono mišinio savybių įtaka monolitinių konstrukcijų paviršiaus kokybei bei jos vertinimas*, Daktaro disertacija, Kaunas: Technologija, 114 p.

Kong, X.; Emmerling, S.; Pakusch, J.; Rueckel, M.; Nieberle, J. 2015. Retardation effect of styrene-acrylate copolymer latexes on cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 75, 23–41.

Kong, X.; Pakusch, J.; Jansen, D.; Emmerling, S.; Neubauer, J.; Goetz-Neuhoeffer, F. 2016. Effect of polymer latexes with cleaned serum on the phase development of hydrating cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 84, 30–40.

Kovler, K.; Bentur, A. 2009. Cracking sensitivity of normal-and high-strength concretes. *ACI Materials Journal*, 106(6), 537–542.

Kurda, R.; de Brito, J.; Silvestre, J. D. 2019. Concrete with High Volume of Recycled Concrete Aggregates and Fly Ash: Shrinkage Behavior Modeling. *ACI Materials Journal*, 116(1), 83–94.

Laskar, A. I.; Talukdar, S. 2008. Rheological behavior of high performance concrete with mineral admixtures and their blending. *Construction and Building materials*, 22(12), 2345–2354.

Lea, F. M. 1960. Cement research: Retrospect and prospect, *Proc. 4th Int. Symp. on the Chemistry of Cement*, Washington DC, pp. 5–8.



- Lea, F. M. 1970. The chemistry of cement and concrete, *Publisher Frederick Edward Arnold Ltd*, London, 727 pp.
- Lecompte, T.; Perrot, A. 2017. Non-linear modeling of yield stress increase due to SCC structural build-up at rest. *Cement and Concrete Research*, 92, 92–97.
- Leemann, A.; Nygaard, P.; Lura, P. 2014. Impact of admixtures on the plastic shrinkage cracking of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites*, 46, 1–7.
- Leemann, A.; Winnefeld, F. 2007. The effect of viscosity modifying agents on mortar and concrete. *Cement and Concrete Composites*, 29(5), 341–349.
- Lerch, W. 1946. The influence of gypsum on the hydration and properties of portland cement pastes, *Proc. ASTM.*, 46, pp. 1252–1292.
- L'Hermite, R. G. 1960. Volume Changes of Concrete, Chemistry of Concrete. *Proceedings of the Fourth International Symposium, Washington, US Department of Commerce, National Bureau of Standards Monograph*, 43, 659–702.
- Li, G.; He, T.; Hu, D.; Huang, R.; Shi, C. 2012. Effects of retarders on the fluidity of pastes containing  $\beta$ -naphthalenesulfonic acid-based superplasticiser. *Advances in Cement Research*, 24(4), 203–210.
- Li, G.; Wu, X. 2005. Influence of fly ash and its mean particle size on certain engineering properties of cement composite mortars. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1128–1134.
- Li, J.; Yao, Y. 2001. A study on creep and drying shrinkage of high-performance concrete, *Cement and Concrete Research*, 31, 1203–1206.
- Li, Z.; Cao, G.; Guo, K. 2018. Numerical method for thixotropic behavior of fresh concrete. *Construction and Building Materials*, 187, 931–941.
- Lorman, W. R. 1940. The theory of concrete creep, *Proc. ASTM.*, 40, pp. 1082–1102.
- Lu, C.; Yang, H.; Mei, G. 2015. Relationship between slump flow and rheological properties of self compacting concrete with silica fume and its permeability. *Construction and Building Materials*, 75, 157–162.
- Lura, P.; Pease, B.; Mazzotta, G. B.; Rajabipour, F.; Weiss, J. 2007. Influence of shrinkage-reducing admixtures on development of plastic shrinkage cracks. *ACI Materials Journal*, 104(2), 187–194.
- Ma, B.G.; Wang, X.G.; Liang, W.Q.; Li, X.G.; He, Z. 2007. Study on early-age cracking of cement-based materials with superplasticizers, *Construction and Building Materials*, 21(11), pp. 2017–2022.
- Ma, K.; Feng, J.; Long, G.; Xie, Y. 2016. Effects of mineral admixtures on shear thickening of cement paste. *Construction and Building Materials*, 126, 609–616.
- Ma, S.; Li, W.; Zhang, S.; Ge, D.; Yu, J.; Shen, X. 2015. Influence of sodium gluconate on the performance and hydration of Portland cement. *Construction and Building Materials*, 91, 138–144.
- Maia, L.; Figueiras, H.; Nunes, S.; Azenha, M.; Figueiras, J. 2012. Influence of shrinkage reducing admixtures on distinct SCC mix compositions. *Construction and Building Materials*, 35, 304–312.

- Marchesini, F. H.; Oliveira, R. M.; Althoff, H.; de Souza Mendes, P. R. 2019. Irreversible time-dependent rheological behavior of cement slurries: Constitutive model and experiments. *Journal of Rheology*, 63(2), 247–262.
- Marchon, D.; Mantellato, S.; Eberhardt, A. B.; Flatt, R. J. 2016. Adsorption of chemical admixtures. In *Science and Technology of Concrete Admixtures*, Woodhead Publishing, pp. 219–256.
- Marchon, D.; Sulser, U.; Eberhardt, A.; Flatt, R. J. 2013. Molecular design of comb-shaped polycarboxylate dispersants for environmentally friendly concrete. *Soft Matter*, 9(45), 10719–10728.
- Marčiukaitis, G. 2013. *Technologinių veiksmų įtaka betono ir gelžbetonio elgsenai: vadovėlis*. Vilnius: Technika, 248 p.
- Mardani-Aghabaglou, A.; Son, A. E.; Felekoglu, B.; Ramyar, K. 2017. Effect of cement fineness on properties of cementitious materials containing high range water reducing admixture. *Journal of Green Building*, 12(1), 142–167.
- Mardani-Aghabaglou, A.; Tuyan, M.; Yılmaz, G.; Ariöz, Ö.; Ramyar, K. 2013. Effect of different types of superplasticizer on fresh, rheological and strength properties of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 1020–1025.
- Maruyama, I.; Sugie, A. 2014. Numerical study on drying shrinkage of concrete affected by aggregate size. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 12(8), 279–288.
- Matulová, K.; Uncik, S. 2015. Effect of shrinkage-reducing admixture on the properties of cement composites. In *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies: Proceedings of the International Conference on Engineering Sciences and Technologies, 27–29 May 2015, Tatranská Štrba, High Tatras Mountains-Slovak Republic* (p. 329). CRC Press.
- Mazzoli, A.; Monosi, S.; Plescia, E. S. 2015. Evaluation of the early-age-shrinkage of Fiber Reinforced Concrete (FRC) using image analysis methods. *Construction and Building Materials*, 101, 596–601.
- Meagher, T.; Shanahan, N.; Buidens, D.; Riding, K.A.; Zayed, A. 2015. Effects of chloride and chloride-free accelerators combined with typical admixtures on the early-age cracking risk of concrete repair slabs, *Construction and building materials*, 94, pp. 270–279.
- Mehdipour, I.; Khayat, K. H. 2018. Enhancing the performance of calcium sulfoaluminate blended cements with shrinkage reducing admixture or lightweight sand. *Cement and Concrete Composites*, 87, 29–43.
- Monosi, S.; Troli, R.; Favoni, O.; Tittarelli, F. 2011. Effect of SRA on the expansive behaviour of mortars based on sulfoaluminate agent. *Cement and Concrete Composites*, 33(4), 485–489.
- Nakanishi, H.; Tamaki, S.; Yaguchi, M.; Yamada, K.; Kinoshita, M.; Ishimori, M.; Okazawa, S. 2003. Performance of a multifunctional and multipurpose superplasticizer for concrete. *Special Publication*, 217, 327–342.

- Nanthagopalan, P.; Haist, M.; Santhanam, M.; Müller, H. S. 2008. Investigation on the influence of granular packing on the flow properties of cementitious suspensions. *Cement and Concrete Composites*, 30(9), 763–768.
- Neville, A.M. 1962. Shrinkage and creep in concrete, *Structural Concrete*, 1(2), London, pp. 49–85.
- Nkinamubanzi, P. C.; Mantellato, S.; Flatt, R. J. 2016. Superplasticizers in practice. In *Science and technology of concrete admixtures*, Woodhead Publishing, pp. 353–377.
- Oblak, L.; Pavnik, L.; Lootens, D. 2013. *From the concrete to the paste: a scaling of the chemistry (in French)*. Association Française de Génie Civil (AFGC), Paris, pp. 91–98. [Žiūrėta: 2018-04-30]. Prieiga per internetą: [www.afgc.asso.fr/images/stories/visites/SCC2013/Proceedings/11-pages%2091-98.pdf](http://www.afgc.asso.fr/images/stories/visites/SCC2013/Proceedings/11-pages%2091-98.pdf)
- Ouyang, J.; Tan, Y.; Corr, D. J.; Shah, S. P. 2016. The thixotropic behavior of fresh cement asphalt emulsion paste. *Construction and Building Materials*, 114, 906–912.
- Papo, A.; Piani, L. 2004. Effect of various superplasticizers on the rheological properties of Portland cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 34(11), 2097–2101.
- Park, C. K.; Noh, M. H.; Park, T. H. 2005. Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures. *Cement and concrete research*, 35(5), 842–849.
- Perrot, A.; Lecompte, T.; Khelifi, H.; Brumaud, C.; Hot, J.; Roussel, N. 2012. Yield stress and bleeding of fresh cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 42(7), 937–944.
- Phan, T. H.; Chaouche, M.; Moranville, M. 2006. Influence of organic admixtures on the rheological behaviour of cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 36(10), 1807–1813.
- Piasta, W.; Sikora, H. 2015. Effect of air entrainment on shrinkage of blended cements concretes, *Construction and Building Materials*, 99, pp. 298–307.
- Piasta, W.; Zarzycki, B. 2017. The effect of cement paste volume and w/c ratio on shrinkage strain, water absorption and compressive strength of high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 140, 395–402.
- Pickett, G. 1956. Effect of aggregate on shrinkage of concrete and a hypothesis concerning shrinkage. In *J. Am. Concr. Inst.*, 52(1), pp. 581–590.
- Pickett, G. 1974. Effect of gypsum content and other factors on shrinkage of concrete prisms, *J. Amer. Concr. Inst.*, 44, pp. 149–175.
- Pihlajavaara, S. E. 1963. Notes on the drying of concrete. *Reports*, 3(79), The State Institute for Technical Research, Helsinki, Finland.
- Plank, J.; Sakai, E.; Miao, C. W.; Yu, C.; Hong, J. X. 2015. Chemical admixtures—Chemistry, applications and their impact on concrete microstructure and durability. *Cement and concrete research*, 78, 81–99.
- Powers, T. C. 1959. Causes and control of volume change, *J. Portl. Cem. Assoc. Research and Development Laboratories*, 1(1), pp. 29–39.
- Qian, C.; Zhang, Y.; Huang, H.; Qu, J.; Guo, J. 2016. Influences of superplasticizers on the basic and drying creep of concrete. *Structural Concrete*, 17(5), 729–735.

Qian, S.; Yao, Y.; Wang, Z.; Cui, S.; Liu, X.; Jiang, H.; Guo, Z.; Lai, G.; Xu, Q.; Guan, J. 2018. Synthesis, characterization and working mechanism of a novel polycarboxylate superplasticizer for concrete possessing reduced viscosity. *Construction and Building Materials*, 169, 452–461.

Qian, Y.; Kawashima, S. 2018. Distinguishing dynamic and static yield stress of fresh cement mortars through thixotropy. *Cement and Concrete Composites*, 86, 288–296.

Qian, Y.; Lesage, K.; El Cheikh, K.; De Schutter, G. 2018. Effect of polycarboxylate ether superplasticizer (PCE) on dynamic yield stress, thixotropy and flocculation state of fresh cement pastes in consideration of the Critical Micelle Concentration (CMC). *Cement and Concrete Research*, 107, 75–84.

Rahman, M. K.; Baluch, M. H.; Malik, M. A. 2014. Thixotropic behavior of self compacting concrete with different mineral admixtures. *Construction and building materials*, 50, 710–717.

Ran, Q.; Gao, N.; Liu, J.; Tian, Q.; Zhang, J. 2013. Shrinkage action mechanism of shrinkage-reducing admixtures based on the pore solution. *Magazine of Concrete Research*, 65(18), 1092–1100.

Rao, G.A. 1998. Influence of silica fume replacement of cement on expansion and drying shrinkage. *Cement and Concrete Research*, 28(10), 1505–1509.

Reddy, M. V. S.; Mrudula, D.; Seshalalitha, M.; Hariprasad, P. 2015. The effect of Crushed Rock Powder and Super plasticizer on the fresh and hardened properties of M30 grade Concrete. *International Journal of Civil, Structural, Environmental & Infrastructure (IJCSERI)*, 5, 25–30.

Reichard, T. W. 1964. Creep and drying shrinkage of lightweight and normal weight concretes. *Nat. Bur. Stand. Monograph*, 74, Washington DC, 40 pp.

Rezvani, M.; Proske, T.; Graubner, C. A. 2019. Modelling the drying shrinkage of concrete made with limestone-rich cements. *Cement and Concrete Research*, 115, 160–175.

Ribeiro, A. B.; Carrajola, A.; Goncalves, A.; Branco, F. 2006. Effectiveness of shrinkage reduction admixtures on cracking of mortar specimens. In *ConcreteLife'06-International RILEM-JCI Seminar on Concrete Durability and Service Life Planning: Curing, Crack Control, Performance in Harsh Environments* (pp. 214–224). RILEM Publications SARL.

Ribeiro, A. B.; Gonçalves, A.; Carrajola, A. 2006. Effect of shrinkage reduction admixtures on the pore structure properties of mortars. *Materials and Structures*, 39(2), 179–187.

Rongbing, B.; Jian, S. 2005. Synthesis and evaluation of shrinkage-reducing admixture for cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 35(3), 445–448.

Ross, A. D. 1944. Shape, size and shrinkage. *Concrete and Constructional Engineering*, London, pp. 193–199.

Roussel, N.; Lemaître, A.; Flatt, R. J.; Coussot, P. 2010. Steady state flow of cement suspensions: a micromechanical state of the art. *Cement and Concrete Research*, 40(1), 77–84.

- Rutkauskas, A. 2018. *Mineralinių priedų poveikis betono atsparumui šarminei korozijai*, Daktaro disertacija, Vilnius: Technika, 128 p.
- Saito, K.; Kinoshita, M.; Umehara, H.; Yoshida, R. 2010. Properties of low-shrinkage, high-strength SCC using shrinkage-reducing admixture, blast furnace slag and limestone aggregates. In *Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete* (pp. 283–293). Springer, Dordrecht.
- Saliba, J.; Rozière, E.; Grondin, F.; Loukili, A. 2011. Influence of shrinkage-reducing admixtures on plastic and long-term shrinkage. *Cement and Concrete Composites*, 33(2), 209–217.
- Sant, G. 2009. *Fundamental Investigations Related to the Mitigation of Volume Changes in Cement-Based Materials at Early Ages*, PhD Dissertation, Purdue University, West Lafayette, IN, USA, pp. 226.
- Sant, G. 2012. The influence of temperature on autogenous volume changes in cementitious materials containing shrinkage reducing admixtures. *Cement and concrete composites*, 34(7), 855–865.
- Sant, G.; Rajabipour, F.; Lura, P.; Weiss, J. 2006. Examining time-zero and early age expansion in pastes containing shrinkage reducing admixtures (SRA's). In *2nd International RILEM Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering* (p. 353). RILEM Publications SARL.
- Schmidt, W.; Brouwers, J.; Kühne, H. C.; Meng, B. 2010. Effects of superplasticizer and viscosity-modifying agent on fresh concrete performance of SCC at varied ambient temperatures. In *Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete*, Springer, Dordrecht, pp. 65–77.
- Scholer, C.F. *The Influence of Retarding Admixtures on Volume Changes of Concrete*. Publication FHWA/IN/JHRP-75/21. Joint Highway Research Project, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1975, pp. 1–30.
- Shacklock, B. W., Keene, Y. W. 1957. The effect of mix proportions and testing conditions on drying shrinkage and moisture movement of concrete, *Cement Concr. Assoc. Tech. Report* TRA, 266, London.
- Shanahan, N.; Buidens, D.; Riding, K.; Zayed, A. 2016. Effect of Chloride-Based Accelerator in the Presence of Water-Reducing and Retarding Admixture on Autogenous Shrinkage, *Journal of the American Ceramic Society*, 99(6), 2147–2158.
- Shideler, J.J. 1952. Calcium chloride in concrete, *J. Amer. Concr. Inst.*, 48(3), pp. 537–559.
- Shoya, M. 1979. Drying shrinkage and moisture loss of super plasticizer admixed concrete of low water cement ratio. *Transactions of the Japan Concrete Institute, Technical Report*, No. II-5, 103–110.
- Singh, R. B.; Singh, B. 2018. Rheological behaviour of different grades of self-compacting concrete containing recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 161, 354–364.
- Skripkiūnas, G. 2007. *Statybinių konglomeratų struktūra ir savybės*: vadovėlis. Kaunas: Vitae Litera, 336 pp.

- Skripkiūnas, G.; Kičaitė, A.; Macijauskas, M. 2016. The influence of calcium nitrate on the plasticizing effect of cement paste. *Journal of civil engineering and management*, 22(3), 434–441.
- Sonebi, M.; García-Taengua, E.; Hossain, K.M.A.; Khatib, J.; Lachemi, M. 2015. Effect of nanosilica addition on the fresh properties and shrinkage of mortars with fly ash and superplasticizer, *Construction and Building Materials*, 84, 269–276.
- Struble, L. J.; Jiang, Q. 2004. Effects of air entrainment on rheology. *Materials Journal*, 101(6), 448–456.
- Sugiyama, T.; Ohta, A.; Tanaka, Y. 1998. Shrinkage reduction type of advanced superplasticizer. *Special Publication*, 179, 189–200.
- Swamy, R. N. 1974. Shrinkage characteristics of ultra-rapid-hardening cement, *Indian Concrete J.*, 48(4), pp. 127–131.
- Swayze, M. A. 1960. Discussion on: Volume changes of concrete. *Proc. 4th Int. Symp. on the Chemistry of Cement*, Washington DC, pp. 700–702.
- Tan, H.; Zou, F.; Ma, B.; Guo, Y.; Li, X.; Mei, J. 2017. Effect of competitive adsorption between sodium gluconate and polycarboxylate superplasticizer on rheology of cement paste. *Construction and Building Materials*, 144, 338–346.
- Tan, H.; Zou, F.; Ma, B.; Liu, M.; Li, X.; Jian, S. 2016. Effect of sodium tripolyphosphate on adsorbing behavior of polycarboxylate superplasticizer. *Construction and Building Materials*, 126, 617–623.
- Tang, X.; Cai, Y.; Wen, J.; Huang, G. 2014. Correlation Between Slump Flow and Rheological Parameters of Compound Pastes with High Volume of Ground Slag. *Journal of The Chinese Ceramic Society*, 42(5), 648–652.
- Tattersall, G. H.; Banfill, P. F. 1983. *The rheology of fresh concrete*, Monograph, Pitman Books Limited, London (England), 356 pp.
- Tioua, T.; Kriker, A.; Barluenga, G.; Palomar, I. 2017. Influence of date palm fiber and shrinkage reducing admixture on self-compacting concrete performance at early age in hot-dry environment. *Construction and Building Materials*, 154, 721–733.
- Tokuda, H.; Shoya, M.; Kawakami, M.; Kagaya, M. 1981. Application of Superplasticizer to Reduce Drying Shrinkage and Thermal Cracking of Concrete, *ACI Special Publication*, vol. 68, pp. 101–120.
- Troxell, G. E.; Raphael, J. M.; Davis, R. E. 1958. Long-time creep and shrinkage tests of plain and reinforced concrete, *Proc. ASTM.*, 58, pp. 1101–1120.
- Valcuende, M.; Marco, E.; Parra, C.; Serna, P. 2012. Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the shrinkage of self-compacting concrete, *Cement and Concrete Research*, 42(4), 583–592.
- Vance, K.; Kumar, A.; Sant, G.; Neithalath, N. 2013. The rheological properties of ternary binders containing Portland cement, limestone, and metakaolin or fly ash. *Cement and Concrete Research*, 52, 196–207.

Vimonsatit, V.; Chindaprasirt, P.; Ruangsiriyakul, S.; Sata, V. 2015. Influence of fly ash fineness on water requirement and shrinkage of blended cement mortars. *Engineering and Applied Science Research*, 42(4), 311–316.

Wallevik, J. E. 2009. Rheological properties of cement paste: thixotropic behavior and structural breakdown. *Cement and Concrete Research*, 39(1), 14–29.

Wallevik, O. H.; Feys, D.; Wallevik, J. E.; Khayat, K. H. 2015. Avoiding inaccurate interpretations of rheological measurements for cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 78, 100–109.

Wallevik, O. H.; Wallevik, J. E. 2011. Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1279–1288.

Weiss, J.; Lura, P.; Rajabipour, F.; Sant, G. 2008. Performance of shrinkage-reducing admixtures at different humidities and at early ages. *ACI Materials Journal*, 105(5), pp. 478–486.

Westerholm, M.; Lagerblad, B.; Silfwerbrand, J.; Forssberg, E. 2008. Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. *Cement and Concrete Composites*, 30(4), 274–282.

Wu, L.; Farzadnia, N.; Shi, C.; Zhang, Z.; Wang, H. 2017. Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 149, 62–75.

Xu, Y.; Guo, J.; Chen, D.; Hu, M.; Li, P.; Yu, Y.; Zhang, H. 2019a. Effects of amphoteric polycarboxylate dispersant (APC) and acetone formaldehyde sulfite polycondensate (AFS) on the rheological behavior and model of oil well cement pastes. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 569, 35–42.

Yahia, A.; Mantellato, S.; Flatt, R. J. 2016. Concrete rheology: a basis for understanding chemical admixtures. In *Science and Technology of Concrete Admixtures*, Woodhead Publishing, pp. 97–127.

Yalçinkaya, Ç.; Yazıcı, H. 2017. Effects of ambient temperature and relative humidity on early-age shrinkage of UHPC with high-volume mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 144, 252–259.

Yang, X.; Sun, Z.; Shui, L.; Ji, Y. 2017. Characterization of the absolute volume change of cement pastes in early-age hydration process based on helium pycnometry, *Construction and Building Materials*, 142, 490–498.

Yang, Y.B.; Wen, Z.Y. 2002. Influence of Different Superplasticizers on Drying Shrinkage of Mortar, *Journal of Building Materials*, 5(4), pp. 336–341.

Yardimci, M. Y.; Baradan, B.; Taşdemir, M. A. 2014. Effect of fine to coarse aggregate ratio on the rheology and fracture energy of steel fibre reinforced self-compacting concretes. *Sadhana*, 39(6), 1447–1469.

Ye, H.; Gao, X.; Zhang, L. 2019. Influence of time-dependent rheological properties on distinct-layer casting of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 199, 214–224.

Yoo, D. Y.; Banthia, N.; Yoon, Y. S. 2016. Mitigating early-age cracking in thin UHPFRC precast concrete products using shrinkage-reducing admixtures. *PCI Journal*, 39–50 pp.

- Yuan, Q.; Zhou, D.; Khayat, K. H.; Feys, D.; Shi, C. 2017. On the measurement of evolution of structural build-up of cement paste with time by static yield stress test vs. small amplitude oscillatory shear test. *Cement and Concrete Research*, 99, 183–189.
- Yun, K. K.; Choi, S. Y.; Yeon, J. H. 2015. Effects of admixtures on the rheological properties of high-performance wet-mix shotcrete mixtures. *Construction and Building Materials*, 78, 194–202.
- Zajac, M.; Skocek, J.; Bullerjahn, F.; Haha, M. B. 2016. Effect of retarders on the early hydration of calcium-sulpho-aluminate (CSA) type cements. *Cement and Concrete Research*, 84, 62–75.
- Zhan, P. M.; He, Z. H. 2019. Application of shrinkage reducing admixture in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 201, 676–690.
- Zhang, W.; Zakaria, M.; Hama, Y. 2013. Influence of aggregate materials characteristics on the drying shrinkage properties of mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 49, 500–510.
- Zhang, X.; Han, J. 2000. The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste. *Cement and concrete research*, 30(5), 827–830.
- Zhang, X.; Zhang, H.; Gao, H.; He, Y.; Jiang, M. 2019. Effect of bubble feature parameters on rheological properties of fresh concrete. *Construction and Building Materials*, 196, 245–255.
- Zhang, Y.; Zhang, Y.; She, W.; Yang, L.; Liu, G.; Yang, Y. 2019a. Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete. *Construction and Building Materials*, 201, 278–285.
- Zhang, Z.; Xu, L.; Tang, M. 2009. Effect of shrinkage reducing admixture on hydration and pore structure of cement based materials. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 37(7), 1244–1248.
- Zhu, Y.; Zhang, H.; Zhang, Z.; Yao, Y. 2017. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) of hydration process and drying shrinkage for cement paste with W/C of 0.25 affected by high range water reducer. *Construction and Building Materials*, 131, 536–541.
- Zuo, W.; Feng, P.; Zhong, P.; Tian, Q.; Gao, N.; Wang, Y.; Yu, C.; Miao, C. 2017. Effects of novel polymer-type shrinkage-reducing admixture on early age autogenous deformation of cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 100, 413–422.



---

## Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

### **Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose**

Macijauskas, M.; Gailius, A. 2013. Influence of cement type and admixtures on rheological properties of cement paste. *Engineering Structures and Technologies = Statybinės konstrukcijos ir technologijos*, 5(4): 175–181. ISSN 2029-882X.

Skipkiūnas, G.; Kičaitė, A.; Macijauskas, M. 2016. The influence of calcium nitrate on the plasticizing effect of cement paste. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(3): 434–441 (Clarivate Analytics Web of Science, IF<sub>2016</sub> = 1,546). ISSN 1392-3730.

Macijauskas, M.; Girskas, G. 2017. The influence of commonly used plasticizing admixtures on the plasticizing effect of cement paste. *Construction Science: Scientific Journal of RTU*, 20(1): 26–32. ISSN 1407-7329.

Skipkiūnas, G.; Macijauskas, M.; Yakovlev, G.; Ignatyeva, A. 2018. The influence of plasticising admixtures on drying shrinkage of cementitious composites. *Engineering Structures and Technologies*, 10(2): 84–93. ISSN 2029-882X.

**Straipsniai kituose leidiniuose**

Macijauskas, M.; Skripkiūnas, G. 2018. The influence of concentrations of cement particles on rheological behavior and thixotropy of portland cement paste. In *Solid State Phenomena*, 276: 27–34. Trans Tech Publications Ltd. ISSN 1662-9779.

Macijauskas, M.; Skripkiūnas, G. 2017. The influence of superplasticizers based on modified acrylic polymer and polycarboxylate ester on the plasticizing effect of cement paste. In *Materials Science Forum*, 904: 167–173. Trans Tech Publications Ltd. ISSN 1662-9752.

---

# Summary in English

## Introduction

### Problem formulation

When using new technologies of concreting works or concrete and reinforced concrete manufacturing (transportation by concrete pumps, nonvibrational forming, etc.), the rheological properties of concrete mixes, such as mixture viscosity, yield stress, and thixotropy of mixtures, or the ability to rebuild their structure and viscosity after mechanical exposure (vibrating, intensive mixing, etc.), are very important. The aforementioned mixture characteristics depend on different technological conditions, i.e. mixture laying and compaction parameters during concreting processes, and are not evaluated at this time. Gaps and/or cracks form in structures with large open surface (floor platforms, road pavements, reservoirs, supporting walls and other thin-walled structures), due to the shrinkage deformations during curing, thus in order to avoid them shrinkage deformations must be determined by assessing the effect of chemical admixtures (including those reducing the shrinkage) and mineral additives. In order to design concrete mixes suitable for such technologies, the impact of various widely used chemical admixtures and mineral additives on the rheological properties of the mixtures and on the shrinkage during the curing must be properly assessed.

### Relevance of the thesis

Currently, modified cement mixtures containing various chemical admixtures and/or active mineral additives have been widely used globally. The list such additives includes

fly ash, ground granulated blast furnace slag, silica fume, etc. They have the capacity to affect many aspects of mixtures as well as technological properties, cement hydration processes, shrinkage, and even the properties of hardened concrete.

The dissertation presents an evaluation of the plasticisation efficiency when using different chemical admixtures and mineral additives, and the influence of plasticisation efficiency on the drying shrinkage deformations of the mixtures with design technological properties during curing. The obtained research results can be used when designing and concreting large-scale structures of concrete and reinforced concrete.

### **Research object**

Cement mixtures, modified with different chemical admixtures and mineral additives, are intended for the concreting of structures with a large open surface.

### **Aim of the thesis**

To study the effect of chemical admixtures and mineral additives on the rheological properties of cement mixes and deformations of drying shrinkages under different technological conditions of mixture use.

### **Objectives of the thesis**

The following objectives must be completed in order to achieve the aim of the thesis:

1. To determine the effect of chemical admixtures and mineral additives on the rheological properties and thixotropy of cement pastes under different technological conditions;
2. To determine the effect of chemical admixtures and mineral additives on the drying shrinkage deformations of cement mixtures;
3. To determine the effect of water quantity, content of paste, and amount of air on the drying shrinkage deformations of cement mixtures;
4. To evaluate the impact of plasticisation efficiency of chemical admixtures and mineral additives on the drying shrinkage of cement mixtures with design technological properties.

### **Research methodology**

The rheological properties of cement pastes were tested by rotary rheometer with coaxial cylinders. The dynamic (yield stresses and plastic viscosity) and static (static yield stresses) rheological properties of pastes were determined by changing the shear rate or shear stress according to the test regime created by the author. Structure recovery rate for the evaluation of paste thixotropy was expressed according to the area between the curves of the static and dynamic yield stresses. Standardised test methods for determination of the density, air volume and consistency (flow table) of the mixture were used for the research of the technological properties of cement mortars.

The drying shrinkage of the cement mixtures was evaluated by the deformations (or change in length) of the samples stored in special curing conditions (at the ambient temperature of 20 °C and relative air humidity 40±5%).

### Scientific novelty of the thesis

The following results, new for materials engineering science, were obtained during the preparation of the dissertation:

1. The impact of chemical admixtures and mineral additives on cement mixtures drying shrinkage deformations and intensity of plastic strength changes (increases) was determined by using plasticisation efficiency and structure recovery index characteristics, at different technological conditions.
2. Equations for the calculation of the drying shrinkage deformations of cement mixtures with chemical admixtures and mineral additives, have been derived by evaluating the efficiency of it plasticisation.

### Practical value of the research findings

The thesis results are applicable in the design and construction of concrete and reinforced concrete structures with a large open surface (floor platforms, road pavements, reservoirs, supporting walls and other thin-walled structures). The results of the thesis can be used to design distances between the deformation (shrinkage) joints in such structures. With the use of chemical admixtures and/or mineral additives, it is possible to increase the distances in the said structures between the deformation joints or to concrete jointless structures.

### Defended statements

1. The cement mix structure recovery rate, which is the expression of the mixture thixotropy and its ability to withstand loads, depends on the volume concentration of cement particles in the mixture and the type, as well as the amount of chemical admixtures or mineral additives.
2. The efficiency of the cement mixture plasticisation depends on the type and amount of chemical admixtures and/or mineral additives, but does not depend on the amount of nominal water in the mixture.
3. The level of plasticisation efficiency changes the water demand in the mixture and the drying shrinkage deformations during the curing of the concrete. Low shrinkage deformations of a cement mixture can be achieved with maximum efficiency of plasticisation.

### Approval of the research findings

6 scientific articles are published on the subject of the dissertation: one in scientific journals, included into publications of the *Clarivate Analytics Web of Science* data base, with an impact factor (Skripkiūnas *et al.*, 2016), three articles in publications of international data bases (Macijauskas and Gailius, 2013; Macijauskas and Girskas, 2017; Skripkiūnas *et al.*, 2018), two articles in conference proceedings (Macijauskas and Skripkiūnas, 2017; Macijauskas and Skripkiūnas, 2018).

The results of research, that was carried out during the preparation of the dissertation, were published in five science conferences in Lithuania and abroad:

1. 5th international conference *International Conference Binders and Materials* (ICBM 2017), 2017, Czech Republic;

2. 5th international conference *International Conference on Metallurgy Technology and Materials* (ICMTM 2017), 2017, China;
3. 12th international conference *Modern Building Materials, Structures and Techniques*, 2016, Vilnius;
4. 19th Lithuanian conference of young scientists *Science – the future of Lithuania*, 2016, Vilnius;
5. 18th Lithuanian conference of young scientists *Science – the future of Lithuania*, 2015, Vilnius.

### Structure of the thesis

The dissertation is comprised of an introduction, three chapters, general conclusions, lists of references, sources, and author's publications on the subject of the dissertation, summary in English and six annexes.

The volume of the dissertation is 152 pages (summary included, annexed excluded), the text contains 55 figures, 22 tables, and 21 equations. 198 literature references were used during the writing of the dissertation.

## 1. The analysis of the effect of chemical admixtures and mineral additives on the rheological properties and shrinkage of cement mixtures

The structure of the concrete mixture consists of three levels of two-component dispersion systems: cement paste, mortar and the concrete mixture itself (Daukšys *et al.*, 2018). Based on its rheological behaviour, cement mixture (paste, mortar or concrete mixture) is often classified as a Bingham structural fluid with two fundamental rheological characteristics – yield stresses and plastic viscosity (Zhang *et al.*, 2019a). Typically, the mixture also has other rheological properties: pseudoplasticity (Erzengin *et al.*, 2018), dilatancy (Feys and Asghari, 2019), thixotropy, and structure build-up parameters (Jiao *et al.*, 2017). Pseudoplasticity and dilatancy occur when the mixture viscosity increases or decreases respectively as shear stresses increase (Xu *et al.*, 2019a). Thixotropy presents through the disruption of the internal structure of the mixture (as it is affected by the shear rate), when the shear stresses and viscosity of the mixture decrease, and the structure build-up parameters, with the mixture at rest, present themselves, when the static yield stresses of the mixture increase (Klovas, 2016). These rheological properties depend not only on technological processes that affect the mixture (Yahia *et al.*, 2016), but also on the structure of the mixture.

The rheological properties of the concrete mixture depend on the following key factors: the concentration of solid particles in the mixture (Daukšys and Skripkiūnas, 2018), the forms of aggregate particles (Yahia *et al.*, 2016), and the cement paste structure (Jiao *et al.*, 2017), which is increasingly formed not only from cement and water, but also includes different types of chemical admixtures and mineral additives. They are particularly affected by free water, while chemically and physically bound (adsorption) water has no effect on the rheological properties of the mixture (Asghari *et al.*, 2016).

The amount of water in the mixture affects not only the rheological properties of the concrete mixture, but also drying shrinkage deformations (Rezvani *et al.*, 2019).

Concrete cracking is still a relevant problem, where internal stresses of concrete increase with resulting increase in shrinkage deformations of the hardened cement paste increase; after internal stresses exceed the yield tensile strength of the concrete, the cracks appear (Maruyama and Sugie, 2014). The shrinkage is a phenomenal occurrence, when during the curing of concrete and shrinkage of the hardened cement paste, the aggregates are compressed, pressing them together, and the restriction of the shrinkage deformations of the hardened cement paste is taking place as well. With both, low and high shrinkage deformations, the cracks that appeared in the concrete can progress and expand even further as the curing time of concrete increases. This causes negative changes in the appearance of the structures and has a negative effect on their integrity, suitability, and durability (Mazzoli *et al.*, 2015).

The drying shrinkage deformations of concrete depend on many technological and structural factors. The most important of those are: cement type, chemical and mineral composition and grain fineness; cement content and W/C ratio; various chemical admixtures and mineral additives, having the effect on the cement hydration mechanism and the kinetics, or the formation of the concrete structure; cement hydration degree; the type of aggregates and their granulometric composition; mechanical properties of aggregates; curing conditions; the ratio of the surface area of the concrete article (element) to the volume; and thickness.

Drying shrinkage of the curing cement mixture is mainly associated with water evaporation. The drying shrinkage mechanism is usually based on capillary forces when the size of the hardened cement paste pores is at least 10 nm and the relative humidity of the environment, where the cement mixture (article) is located, varies from 40–50 to 80% within the range (Rezvani *et al.*, 2019). Capillary forces act as a hydrostatic pressure that causes the porous hardened cement paste to shrink under tensile stresses in the pore walls that occur when the water evaporates or otherwise exits the curing cement mixture (Rezvani *et al.*, 2019).

Regardless of the structural level of the concrete mix analysed, the mechanism of action of chemical admixtures and mineral additives takes place at the paste level (microstructure level), and their action effect manifests in both the mortar mixture (mesostructure level) and the concrete mixture (macrostructure level) (Yahia *et al.*, 2016). Therefore, the use of chemical admixtures and/or mineral additives with plasticisation efficiency can reduce not only the amount of water and/or cement paste in the mixture, while maintaining the constant technological properties of the cement mixture (without altering the consistency of the mixture and/or without changing strength properties of the mixture), but also the drying shrinkage deformations of the curing cement mixture respectively.

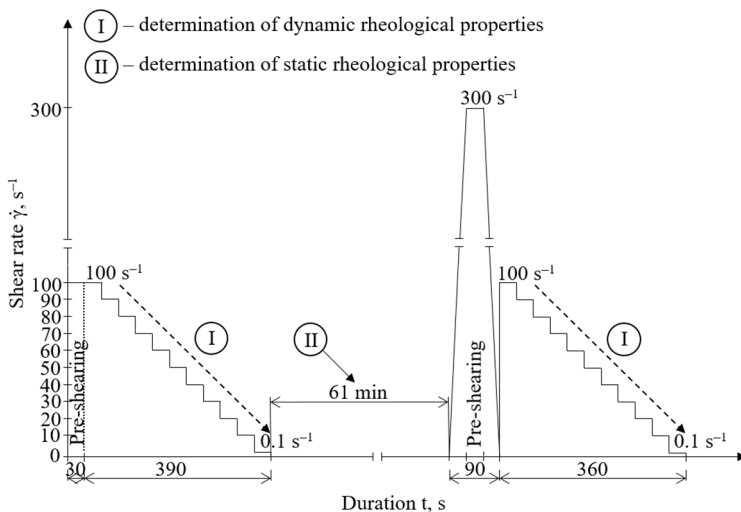
## 2. Overview of raw materials and research methodology

Different types of cement were used for testing (according to LST EN 197-1:2011): Portland cement CEM I 42.5 R (CIR), CEM I 42.5 N (CIN), and CEM I 42.5 N SR3 (CINSR3; with less  $C_3A$ ), and a composite Portland Cement CEM II/A-S 42.5 N (CIASN) and CEM II/A-LL 42.5 N (CHALLN), a portion of its clinker (17%) was replaced with ground granulated blast furnace slag and limestone respectively. Cement is made by Akmenės Cementas JSC, Naujoji Akmenė. Sand (0/4 fraction) from Miškiniai

quarry (Trakai region, Lithuania), and granite gravel (2/5 fraction) from quarry RUPP Granit (Luninets region, Belarus) were used as a fine and coarse filler for testing.

Mineral additives widely available and used in the region of Lithuania: ground granulated blast furnace slag (GGBFS), fly ash (FA), and silica fume (SF), were tested in the thesis. Chemical admixtures widely available and used in the Lithuanian region are tested as well: plasticiser (LS; based on modified lignosulfonates), superplasticiser (MAP; based on modified acrylic polymers), superplasticiser (PCE; based on polycarboxylate esters), air entraining admixture (AEA; based on surfactants), setting retarder (SG; based on sodium gluconate), setting accelerator (CN; based on calcium nitrate), viscosity modifying admixture (VMA; based on high molecular weight synthetic copolymers), and shrinkage reducing admixture (SRA; based on surfactants). It should be noted that the amounts of chemical admixtures are selected according to the dosage limits recommended by the manufacturers. Quantities of mineral additives were selected according to the amounts of additives used by manufacturers to produce different types of composite cement, and according to the results of scientific studies conducted before, and recommendations thereof.

Special mode of rotational rheometer Rheotest RN4.1 with coaxial cylinders for measurement of shear rate (from 0 to  $100 \text{ s}^{-1}$ ) and shear stress changes (from 0 to 300 Pa) was chosen to test the impact of chemical admixtures and mineral additives to the rheological properties and structural recovery rate of the cement paste (Fig. S2.1).



**Fig. S2.1.** Rotational rheometer Rheotest RN4.1 with coaxial cylinders mode for measurement of shear stresses and shear rates changes

The measurement mode consisted of the determination of the dynamic (yield stresses and plastic viscosity) and static (static yield stresses) rheological properties of the paste. In order to determine the thixotropy of the paste (after its irreversible structural changes were evaluated), the dynamic rheological properties were determined prior to



and after the determination of the static rheological properties. It should be noted that before each determination of dynamic rheological properties, the paste is remixed and its structure disrupted by a relatively high cycle of shear rate.

Flow curves were obtained 10 and 80 min after mixing of pastes in order to determine their dynamic rheological properties. By increasing the shear rate from 10 to 40 s<sup>-1</sup> and by applying the Bingham rheological model to the flow curves obtained, the yield stresses ( $\tau_0$ ) and the plastic viscosity ( $\mu_{pl.}$ ) were determined.

While keeping the paste at rest for 60 min, static rheological properties (static yield stresses) were determined. It should be noted that during the evaluation of the initial paste structure, the control static yield stress was determined after keeping the paste at rest for 1 min.

The rheometer measurement mode for static rheological properties is selected so that the shear stresses acting on the paste increase by 3.33 Pa/s to 300 Pa or until the shear rate value is greater than 0.2 s<sup>-1</sup>. This criterion is included to reduce the deformation of the paste and the disruption of the structure. When the set permissible limit was reached, the rheometer was stopped and the paste was left at rest for 10 min. The measurement was repeated 6 times every 10 min until the paste remained at rest for 60 min.

After keeping the paste at rest for 61 min and evaluating its irreversible structural changes (the change in dynamic yield stresses), the structural recovery rate was determined. It is expressed as a recovering area of the structure between two curves – static and dynamic yield stresses, in order to assess paste thixotropy.

The digital indicator with an accuracy of 0.001 mm (micrometer) was used to determine the drying shrinkage deformations of cement mixtures. The drying shrinkage was evaluated by the deformations of the samples stored in special curing conditions (at the ambient temperature of 20 °C and relative air humidity 40±5%), from the second day of curing up to 6 months.

### 3. Research of the plasticisation efficiency of chemical admixtures and mineral additives on the deformations of the drying shrinkage of the cement mixtures

The efficiency of plasticisation, which is an important technological indicator (in the concreting and mixture transportation technological processes), is expressed as a percentage of the change in the plastic viscosity of the cement paste, after adding a certain amount of chemical admixture and/or mineral additive to it.

Plasticisation efficiency of chemical admixtures and mineral additives is calculated according to the equation (S3.1):

$$Eff_{pl} = \frac{\mu_{pl.0} - \mu_{pl.i}}{\mu_{pl.0}} \cdot 100, \quad (S3.1)$$

here  $Eff_{pl}$  – plasticisation efficiency of chemical admixtures and/or mineral additives, %;  $\mu_{pl.0}$  – plastic viscosity of the cement paste without chemical admixtures and/or mineral additives, Pa·s;  $\mu_{pl.}$  – plastic viscosity of the cement paste modified by chemical admixtures and/or mineral additives, Pa s.

While maintaining constant W/C and adding a certain amount of chemical admixture (LS, MAP, PCE, AEA, SG, CN, VMA, or SRA) to a Portland cement (CIR) paste, or

by replacing a portion of the Portland cement clinker with mineral additive (GGBFS, FA, or SF) their plasticisation efficiency was determined. It should be noted that the plasticisation efficiency of chemical admixtures and mineral additives has been determined 10 min after the beginning of paste mixing.

The plasticisation efficiency of plasticiser (LS) and superplasticisers (MAP) and (PCE) for pastes of Portland cement was tested. It has been determined that the plasticisation efficiency depends on the chemical composition and amount of the plasticising admixture in the paste. It was determined that the efficiency of LS plasticisation steadily increases from 8.4 to 34.7%, when increasing the amount of admixture from 0.2 to 1.2% of the cement weight. The efficiency of the MAP or PCE plasticisation increases rapidly from 30.2 to 63.4% and from 37.7 to 71.9%, respectively, when increasing the amount of the admixture from 0.2 to 0.8%. By further increasing the amount of MAP or PCE from 0.8 to 1.2%, their plasticisation efficiency increases slightly from 63.4 to 69.2% and from 71.9 to 80%, respectively. In summary, it can be stated that PCE has a higher plasticisation efficiency than LS or MAP. Recommended PCE content is 0.8%.

The plasticisation efficiency of air entraining admixture (AEA) for Portland cement pastes was tested. It was determined that the efficiency of plasticisation of AEA depends on its amount in the paste. It was determined that the efficiency of AEA plasticisation rapidly increases from 9.3 to 37.5%, as the amount of entrained air increases in the paste with the admixture content from 0.01 to 0.1% of the cement weight. By further increasing the amount of the admixture from 0.1 to 0.2%, its plasticisation efficiency increases from 37.5 to 51.6%.

The plasticisation efficiency of setting retarder (SG) and setting accelerator (CN) for Portland cement pastes was tested. It was determined that the efficiency of plasticisation of SG depends on its amount in the paste. It was determined that increase in the amount of SG from 0.1 to 0.6% of the cement weight causes a gradual increase in its plasticisation efficiency from 1.6 to 11.1%. By further increasing the amount of the admixture from 0.6 to 1.2%, its plasticisation efficiency slightly increases from 11.1 to 15.0%. It was also determined that increase in the amount of CN from 0.2 to 1.0% of the cement weight causes a slight increase in its plasticisation efficiency from -3.4 to -1.7%. By further increasing the amount of the admixture from 1.0 to 2.0%, its plasticisation efficiency slightly decreases from -1.7 to -3.0%. In conclusion, the obtained results show that SG increases the plasticisation efficiency to 15.0%, when the content is 1.2% of the cement weight, while CN modifies the plasticisation efficiency insignificantly, i.e. reduce to -3.4% (when the content of admixture is 0.2%).

The plasticisation efficiency of viscosity modifying admixture (VMA) for Portland cement pastes was tested. It was determined that the efficiency of plasticisation of VMA depends on its amount in the paste. It was determined that increase in the amount of VMA from 1.0 to 2.0% of the cement weight causes a slight change in its plasticisation efficiency. By further increasing the amount of the admixture from 2.0 to 3.0%, its plasticisation efficiency evenly decreases from -1.1 to -7.9%, and when the amount is increased to 3.6%, the plasticisation efficiency rapidly decreases to -21.1%.

The plasticisation efficiency of shrinkage reducing admixture (SRA) for Portland cement pastes was tested. It was determined that the efficiency of plasticisation of SRA depends on its amount in the paste. It was determined that increase in the amount of

SRA from 0.2 to 1.0% of the cement weight causes a even increase in its plasticisation efficiency from 4.8 to 14.2%. By further increasing the amount of the admixture from 1.0 to 2.1%, its plasticisation efficiency rapidly increases from 14.2 to 40.3%.

The plasticisation efficiency of the ground granulated blast furnace slag (GGBFS) and fly ash (FA) for pastes of Portland cement was researched. It was determined that the efficiency of plasticisation of both GGBFS and FA depends on their amount in the paste. It was determined that when changing the portion of Portland cement clinker from 15 to 30% GGBFS, its plasticisation efficiency is reduced from -8.9 to -28.9%. It changing the portion of Portland cement clinker further from 30 to 60% GGBFS, its plasticisation efficiency is rapidly reduced from -28.9 to -104.4%. It has been also determined that when increasing the amount of FA (the cement substitute) from 15 to 30%, their plasticisation efficiency rapidly increases from 18.8 to 33.5%. By further increasing the amount of the cement substitute from 30 to 60%, its plasticisation efficiency increases less, from 33.5 to 46.6%. Recommended optimal FA content is 30%.

The plasticisation efficiency of SiO<sub>2</sub> fume (SF) for Portland cement pastes was tested. It was determined that the efficiency of plasticisation of SF depends on their amount in the paste. It was determined that when changing the portion of Portland cement clinker from 2 to 10% SF, its plasticisation efficiency is gradually reduced from -4.1 to -39.3%.

The impact of the change in the water demand on the drying shrinkage of cement mortars with identical consistency, when their curing times are different, has been researched. It has been established that when the water demand is reduced from 0 to 20%, the drying shrinkage of mortars decreases evenly from 1.75 to 1.50 mm/m and from 3.03 to 2.61 mm/m, after 28 and 180 days of curing, respectively. If the water demand is reduced further to 30%, the drying shrinkage of mortars is slightly reduced: up to 1.44 mm/m after 28 days, and up to 2.49 mm/m after 180 days. Hence, the drying shrinkage depends not only on the water demand in the mixture, but also on the characteristics of the microstructure of the hardened cement paste and the capillary pores.

The impact of the change in the content of paste on the drying shrinkage of cement mortars with identical consistency, when their curing times are different, has been researched. When increasing or decreasing the W/C ratio, the deformations of the mortar drying shrinkage change. It has been determined that the drying shrinkage change not due to water content, but due the W/C ratio. This may be because the W/C ratio adjusts the porosity of mortars.

The effect of entrained air (AE) amount on the drying shrinkage of cement mortars at their different curing times has been tested. It has been found that with increase in the amount of AE from 2.6 to 9.6% (when increasing the amount of AEA from 0 to 0.15% of the cement weight) and increase of the curing time, the drying shrinkage of the modified mortars slightly increases. This can be explained by the fact that enclosed pores in the cement mixture do not fill with water. Therefore, mixtures do not swell during curing under humid ambient conditions and do not shrink under dry ambient conditions.

The effect of shrinkage reducing admixture (SRA) on the drying shrinkage of cement mortars at their different curing times has been tested. It has been established that when the SRA content is increased from 0 to 1.0% of the cement weight, the drying shrinkage of modified mortars decreases evenly from 1.50 to 1.29 mm/m and from 2.61

to 2.37 mm/m, after 28 and 180 days of curing, respectively. By further increasing the SRA content to 2.0%, the drying shrinkage of mortars decreases to 1.07 mm/m after 28 days, and to 2.12 mm/m after 180 days.

With different curing times, the SRA efficiency to reduce the cement mixture drying shrinkage is calculated according to the equation (S3.2):

$$Eff_{sh_i} = \frac{Sh_{0,i} - Sh_i}{Sh_{0,i^*}} \cdot 100, \quad (S3.2)$$

here  $Eff_{sh_i}$  – the effectiveness of the shrinkage reducing admixture to reduce the cement mixture drying shrinkage over  $i$  days of curing, %;  $Sh_{0,i}$  – deformation of the drying shrinkage of cement mixtures without the shrinkage reducing admixture after  $i$  days of curing, mm/m;  $Sh_i$  – deformation of the drying shrinkage of cement mixtures modified with the shrinkage reducing admixture after  $i$  days of curing, mm/m;  $Sh_{0,i^*}$  – deformation of the drying shrinkage of cement mixtures without the shrinkage reducing admixture after  $i^*$  days of curing, mm/m.

As the curing time increases, the SRA efficiency to reduce the drying shrinkage of the mortar is evaluated according to the shrinkage value of the mortar without SRA, considering it as the reference point after  $i^*$  days of curing. It should be noted that the samples formed for this study were cured for 7 days in a polyethylene film. It is known that polyethylene film stops the water evaporation from samples. Therefore, in order to evaluate only the effectiveness of the SRA, and while avoiding the effect of overlapping processes on the drying shrinkage of mortars, the appropriate reference point was selected – after 7 days.

It has been established that when curing time extends to 84 days, the effectiveness of the SRA to reduce the drying shrinkage of mortars increases: with a 1.0% of cement mass, SRA reduces the shrinkage up to 134%, and with 2.0% – up to 274%. As the curing time increases further to 180 days, the SRA efficiency is slightly reduced.

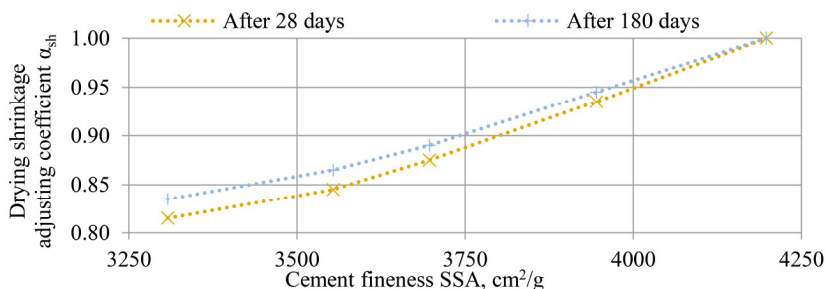
The impact of the different types of cement on the drying shrinkage of cement mortars with identical consistency, when their curing times are different, has been researched. It has been established that mortars with Portland Cement CEM I 42.5 R, with the largest specific surface area (4198 cm<sup>2</sup>/g), when compared to the specific surface area of other cements, have the highest drying shrinkage: CEM I 42.5 N (3554 cm<sup>2</sup>/g), CEM I 42.5 N SR3 (3697 cm<sup>2</sup>/g), CEM II/A-S 42.5 N (3308 cm<sup>2</sup>/g) with CEM II/A-LL 42, 5 N (3945 cm<sup>2</sup>/g). When a portion of Portland cement clinker of up to 17% is replaced with ground granulated blast furnace slag, the drying shrinkage of mortars is slightly different from that of mortars containing Portland cement CEM I 42.5 N or CEM I 42.5 N SR3 (with reduced C<sub>3</sub>A content) of a similar fineness. Furthermore, by replacing the Portland cement clinker portion of up to 17% with limestone, the mortar shrinkage also slightly differs from that of mortars with Portland cement CEM I 42.5 R of similar fineness. Therefore, the drying shrinkage of mortars with different types of cement was assessed by their specific surface area.

It has been established that as the cement specific surface increases from 3308 to 3697 cm<sup>2</sup>/g, the drying shrinkage of mortars increases slightly from 1.40 to 1.50 mm/m and from 2.41 to 2.58 mm/m, after 28 and 180 days of curing, respectively. As the speci-

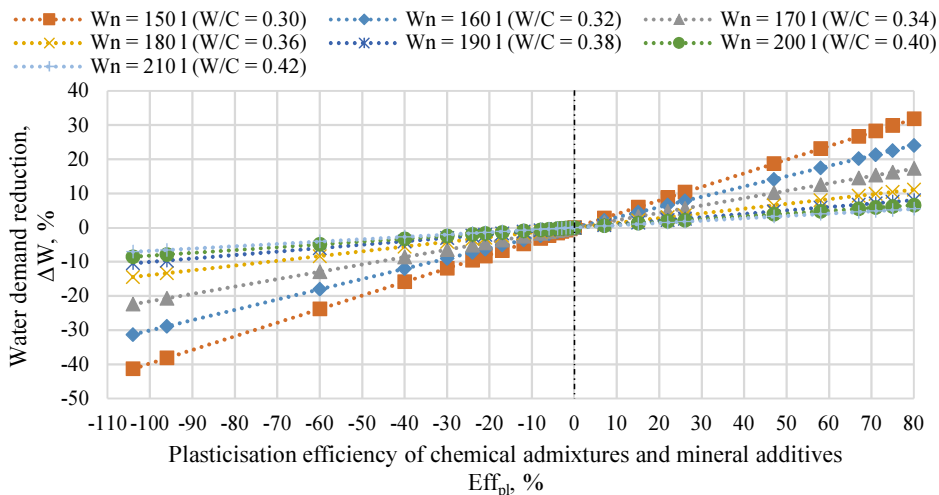
fic surface area of the cement increases further to 4198 cm<sup>2</sup>/g, the drying shrinkage of mortars increases rapidly to 1.72 mm/m after 28 days, and to 2.90 mm/m after 180 days.

In order to evaluate the dependence of cement mixtures drying shrinkage (after 28 or 180 days of curing) on the specific surface area of a different cement, a diagram for the selection of the shrinkage correcting coefficient ( $\alpha_{sh}$ ) is presented in the Fig. S3.1.

A diagram was obtained after the determination of the plasticisation efficiency of chemical admixtures (LS, MAP, PCE, AEA, SG, CN, VMA, and SRA) and mineral additives (GGBFS, FA, and SF) and its effect on the change in water demand in cement mixtures with of identical viscosity, but with different nominal water content (Fig. S3.2). It should be noted that the nominal water content of the mixtures changed from 150 l/m<sup>3</sup>, and the ratio of W/C changed from 0.30 to 0.42 respectively (range step – 0.2).



**Fig. S3.1.** Diagram to determine the adjusting coefficient of the drying shrinkage of the cement mixtures after 28 and 180 days of curing



**Fig. S3.2.** Diagram to determine the change in water demand in cement mixtures with identical viscosity when nominal water content differs (W/C ratio)

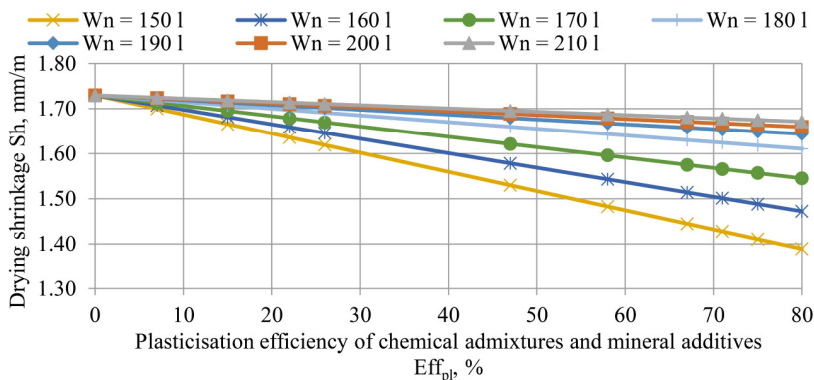
It has been established that the size of the reduction in water demand to obtain cement mixtures with identical viscosity depends on the nominal water content of the mixture. In case of a low nominal water content ( $150 \text{ l/m}^3$ ) in rigid mixtures, a reduction of the water demand reaches up to 32%, when the plasticisation efficiency is 80%, and when the nominal water content is high ( $210 \text{ l/m}^3$ ) in fluid mixtures, a reduction of water demand is 6% (Fig. S3.2). After the analysis of the obtained results (Fig. S3.2), the empirical equation (S3.3) for the determination of the change in the water demand for cement mixtures of identical viscosity, but with different plasticisation efficiency of the chemical admixtures and/or mineral additives and the nominal water content (W/C ratio), was derived.

$$\Delta W = (98362 \cdot 10^{-9} \cdot W_n^2 - 40915 \cdot 10^{-6} \cdot W_n + 4.3248) \cdot Eff_{pl}, \quad (\text{S3.3})$$

here  $\Delta W$  – change in the water demand in the mixture, %;  $W_n$  – amount of nominal water in a cement mixture;  $Eff_{pl}$  – plasticisation efficiency of chemical admixtures and/or mineral additives, %.

The drying shrinkage of cement mixture after 28 and 180 days of curing can be predicted. Forecasting is presented in diagrams (Fig. S3.3 and S3.4). Diagrams (Fig. S3.3 and S3.4) were obtained after determining the dependence of the mortar drying shrinkage on the change in the water demand, and the dependence of the change in the water demand on the plasticisation efficiency of chemical admixtures and mineral additives (Fig. S3.2).

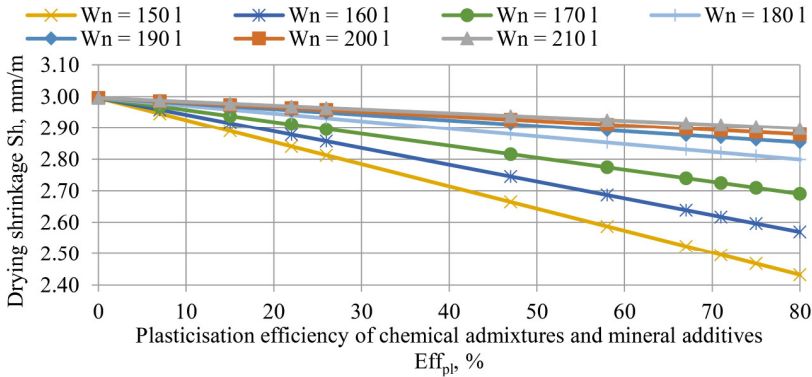
It has been established that the increasing plasticisation efficiency of chemical admixtures and mineral additives reduces the water demand for the preparation of cement mixtures with identical viscosity (Fig. S3.2), it causes the decreasing drying shrinkage of cement mixtures when their curing times differ (Fig. S3.3 and S3.4).



**Fig. S3.3.** Diagram to determine the drying shrinkage of the cement mixtures after 28 days of curing

It should be noted that when the amount of viscosity modifying admixture (VMA), ground granulated blast furnace slag (GGBFS) or  $\text{SiO}_2$  fume (SF), is increased in cement mixtures, their plasticisation efficiency is dropping. In order to maintain a constant or

reduced water demand in the mixtures, plasticising chemical admixtures, which effectively increase the efficiency of the plasticisation, are used. Therefore, the drying shrinkage of mixtures can be predicted from the charts presented (Fig. S3.3 and S3.4) only when the plasticisation efficiency of chemical admixtures and/or mineral additives is positive.



**Fig. S3.4.** Diagram to determine the drying shrinkage of the cement mixtures after 180 days of curing

After analyzing the results obtained (Fig. S3.1, S3.3, and S3.4), empirical equations (S3.4) and (S3.5) have been derived to predict the drying shrinkage of cement mixtures with different contents of nominal water and cement fineness, after 28 or 180 days of curing, respectively.

$$Sh_{28} = \left( (-1052 \cdot 10^{-9} \cdot W_n^2 + 4378 \cdot 10^{-7} \cdot W_n - 4627 \cdot 10^{-5}) \cdot \frac{Eff_{pl}}{Eff_{pl} + 1.730} \right) \cdot \alpha_{sh}, [R = 0.9999; R^2 = 0.9999]; \quad (S3.4)$$

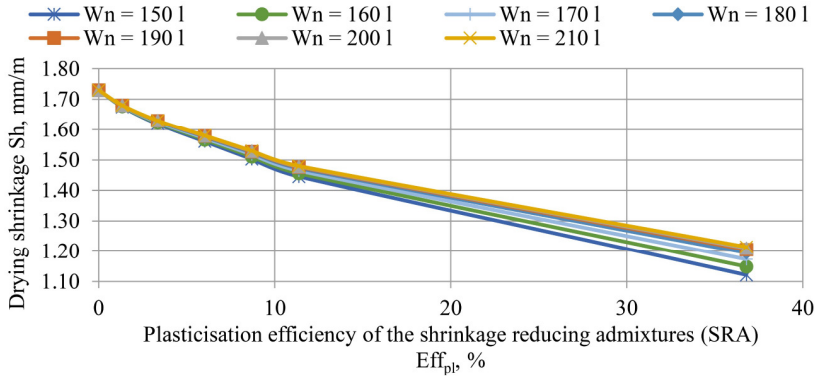
$$Sh_{180} = \left( (-1741 \cdot 10^{-9} \cdot W_n^2 + 7241 \cdot 10^{-7} \cdot W_n - 7655 \cdot 10^{-5}) \cdot \frac{Eff_{pl}}{Eff_{pl} + 2.996} \right) \cdot \alpha_{sh}, [R = 0.9999; R^2 = 0.9999], \quad (S3.5)$$

here  $Sh_{28}$ ,  $Sh_{180}$  – drying shrinkage of cement mixtures, after 28 and 180 curing days respectively, mm/m;  $W_n$  – amount of nominal water in a cement mixture, l;  $Eff_{pl}$  – plasticisation efficiency of chemical admixtures and/or mineral additives, %;  $\alpha_{sh}$  – coefficient correcting the drying shrinkage (selected from the diagram presented in the Fig. S3.1).

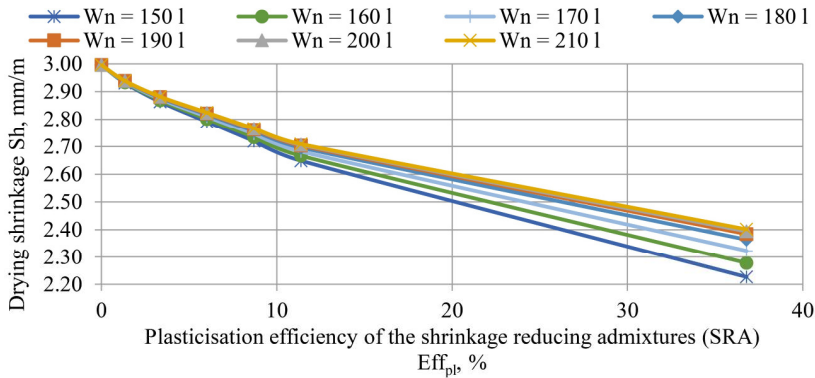
Shrinkage reducing admixture (SRA) not only reduces the drying shrinkage of cement mixtures, but also has the plasticisation efficiency. Therefore, knowing the plasticisation efficiency of SRA, the diagrams for predicting the drying shrinkage of the SRA modified cement mixtures after 28 and 180 days of curing are presented in Fig. S3.5 and S3.6.

After analysing the results obtained (Fig. S3.1, S3.5, and S3.6), empirical equations (S3.6) and (S3.7) have been derived to predict the drying shrinkage of SRA modified

cement mixtures with different contents of nominal water and cement fineness, after 28 or 180 days of curing, respectively.



**Fig. S3.5.** Diagram to determine the drying shrinkage of the cement mixtures modified with shrinkage reducing admixture (SRA) after 28 days of curing



**Fig. S3.6.** Diagram to determine the drying shrinkage of the cement mixtures modified with shrinkage reducing admixture (SRA) after 180 days of curing

It should be noted that by increasing the efficiency of plasticisation of SRA to 11%, the drying shrinkage of cement mixtures with different nominal water contents (from 150 to 210 l/m<sup>3</sup>) decreases in a similar manner (Fig. S3.5 and S3.6). Therefore, the equations (S3.6) and (S3.7) apply when the efficiency of plasticisation of SRA is at least 11%.

$$Sh_{28} = \left( (-68155 \cdot 10^{-11} \cdot W_n^2 + 28349 \cdot 10^{-8} \cdot W_n - 39946 \cdot 10^{-6}) \cdot \right. \\ \left. Eff_{pl} - 25411 \cdot 10^{-10} \cdot W_n^2 + 10570 \cdot 10^{-7} \cdot W_n + 1.4887 \right) \cdot \alpha_{sh}, \quad (S3.6) \\ [R = 0.9999; R^2 = 0.9999];$$



$$Sh_{180} = \left( (-13429 \cdot 10^{-10} \cdot W_n^2 + 55859 \cdot 10^{-8} \cdot W_n - 70210 \cdot 10^{-6}) \cdot Eff_{pl} - 27148 \cdot 10^{-10} \cdot W_n^2 + 11293 \cdot 10^{-7} \cdot W_n + 2.7289 \right) \cdot \alpha_{sh}, \quad (S3.7)$$

$$[R = 0.9999; R^2 = 0.9999],$$

here  $Sh_{28}$ ,  $Sh_{180}$  – drying shrinkage of cement mixtures, after 28 and 180 curing days respectively, mm/m;  $W_n$  – amount of nominal water in a cement mixture,  $l$ ;  $Eff_{pl}$  – plasticisation efficiency of shrinkage reducing admixture, %;  $\alpha_{sh}$  – coefficient correcting the drying shrinkage (selected from the diagram presented in the Fig. S3.1).

## General conclusions

1. The plasticisation efficiency and the structural build-up rate must be evaluated through the use of various chemical admixtures and/or mineral additives in the cement mixture. The efficiency of plasticisation determines the technological characteristics of the mixture and its water demand, as well as the drying shrinkage deformations. The structural build-up rate determines the mixture laying characteristics, using vibration or other mechanical means for compaction.
2. As the volume concentration of solid cement particles increases from 0.434 to 0.518 (W/C ratio decreases from 0.42 to 0.30), the build-up rate of the structure of Portland cement paste without mineral additives, which describes a thixotropy of cement mixtures, increases exponentially from 977 to 5291 Pa min.
3. The efficiency of the plasticisation of cement mixtures: is increased by: air entraining admixtures (based on surfactants) up to 52%, setting retarders (based on sodium gluconate) up to 11%, shrinkage reducing admixtures (based on surfactants) up to 40%, fly ash up to 47%; and reduced by: setting accelerators (based on calcium nitrate) up to 4%, viscosity modifying admixtures (based on high molecular weight copolymers) up to 21%, ground granulated blast furnace slag up to 104%, and SiO<sub>2</sub> fumes up to 39%.
4. The drying shrinkage deformations of cement mixtures with plasticising admixtures steadily increase up to 18%, as their water demand increases up to 30%. As the cement fineness increases from 3300 to 4200 cm<sup>2</sup>/g the drying shrinkage deformations also increase to 20%, regardless of the type of cement. The content of cement paste and the amount of entrained air have no effect on the shrinkage of the mixtures.
5. Shrinkage reducing admixtures based on surfactants, when their content is 1% of the cement weight, reduce the drying shrinkage of cement mixtures to 125%, and when the content is 2%, reduce to 250% after 180 days of curing.
6. The cement mixture water demand to obtain mixtures of identical viscosity depends on the plasticisation efficiency of chemical admixtures and/or mineral additives, as well as the nominal water content in mixtures. With low nominal water content (150 l/m<sup>3</sup>) in rigid mixtures, the water demand is reduced to 32%, and with high water content (210 l/m<sup>3</sup>) in fluid mixtures, the water demand is reduced to 6%, when the plasticisation efficiency of admixtures and/or additives is 80%.

7. The drying shrinkage of cement mixtures depends on the efficiency of plasticisation of chemical admixtures and mineral additives. The shrinkage of mixtures after 180 days of curing is steadily decreasing to 19%, with plasticisation efficiency increasing to 80%.
8. According to the obtained results of the plasticisation efficiency, it is possible to determine the drying shrinkage deformations of rigid and fluid cement mixtures in case of different chemical admixtures, mineral additives and cements of different fineness during curing.

---

## Priedai<sup>3</sup>

**A priedas.** Skirtingos cemento dalelių koncentracijos portlandcemenčio tešlos tekėjimo kreivės

**B priedas.** Cheminėmis įmaišomis modifikuotos portlandcemenčio tešlos tekėjimo kreivės

**C priedas.** Mineraliniais priedais modifikuotos portlandcemenčio tešlos tekėjimo kreivės

**D priedas.** Autoriaus sąžiningumo deklaracija

**E priedas.** Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje

**F priedas.** Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

---

<sup>3</sup> Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Mindaugas MACIJASKAS

CHEMINIŲ ĮMAIŠŲ IR MINERALINIŲ PRIEDŲ  
POVEIKIS CEMENTINIŲ MIŠINIŲ REOLOGINĖMS  
SAVYBĖMS IR TRAUKUMUI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,  
Medžiagų inžinerija (T 008)

INFLUENCE OF CHEMICAL ADMIXTURES AND  
MINERAL ADDITIVES ON RHEOLOGICAL PROPERTIES  
AND SHRINKAGE OF CEMENT MIXTURES

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,  
Materials Engineering (T 008)

2019 07 19. 14,5 sp. I. Tiražas 20 egz.  
Vilniaus Gedimino technikos universiteto  
leidykla „Technika“,  
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,  
<http://leidykla.vgtu.lt>  
Spausdino BĮ UAB „Baltijos kopija“,  
Kareivių g. 13B, LT-09109 Vilnius